Tihomil Jelaković

ZVUK · SLUH · ARHITEKTONSKA AKUSTIKA



ŠKOLSKA KNJIGA – ZAGREB

U — 164/1 *30622*

Tihomil Jelaković

ZVUK • SLUH • ARHITEKTONSKA AKUSTIKA

A AUDIOTEHNIKA

urednik biblioteke: **dr. ing. Željko Matutinović**

Stručni urednik

ŽELIMIR ČOLIĆ, dipl. ing.

Lektor

ANTUN ČESKO, prof.

Crteže izradio

DRAGUTIN VESELINOVIĆ

Drugo, prerađeno i dopunjeno izdanje. Prvo izdanje izašlo je pod naslovom „*Arhitektonska akustika*", Tehnička knjiga, Zagreb, 1962.

Tisak: „Minerva", Subotica — OOUR štamparska delatnost

Prof. dr TIHOMIL JELAKOVIĆ

ZVUK · SLUH · ARHITEKTONSKA AKUSTIKA



Školska knjiga
Zagreb, 1978

PREDGOVOR PRVOM IZDANJU

Zapisi o arhitektonskoj akustici, što ih je Vitruvije ostavio u svojem djelu „O arhitekturi", vjerojatno su prvi u pisanoj povijesti. Trebalo je čekati sve do devetnaestog stoljeća pa da prostorna akustika dobije naučnu osnovu. U tome je pionirski posao izvršio Amerikanac Wallace Clement Sabine.

Izumom elektronke u početku ovog stoljeća omogućeno je građenje instrumenata koji su mogli precizno mjeriti akustičke pojave. Razvoj radio-difuzije i snimanja zvuka dao je novi impuls ispitivanju akustičkih pojava u prostorijama. U novije se vrijeme zbog sve intenzivnijeg razvoja tehnike i industrije pojavio problem buke, koji je građevinskoj akustici nametnuo zadatak kako da modernom čovjeku sačuva tišinu i zdravlje.

Kod nas se dosada arhitektonskoj akustici posvećivalo malo pažnje. Škole su nam suviše ječne, bolnice suviše bučne, a mnoge dvorane sagrađene bez primjene osnovnih principa arhitektonske akustike. Vjerujem, međutim, da neće proći mnogo vremena, pa ćemo se i u pogledu arhitektonske akustike uvrstiti među tehnički napredne zemlje. Ako ova knjiga unekoliko pridonese tome nastojanju, njezin će zadatak biti ispunjen.

Zagreb, marta 1962. T. J.

PREDGOVOR DRUGOM IZDANJU

Naslov „Zvuk, sluh, arhitektonska akustika" odgovarao bi i prvom izdanju jer je već u njemu fizikalnoj akustici, slušnoj akustici i govoru i muzici dodijeljen mnogo veći prostor nego što je uobičajeno u knjigama namijenjenima akustici prostorija i zaštiti od buke. To pogotovu vrijedi za ovo izdanje u kojemu je tim područjima dano još više mjesta.

Promjene i dopune unesene su u sve dijelove knjige. Upozorit ćemo na one važnije.

U prvu glavu u kojoj su obrađeni temeljni pojmovi fizikalne akustike umetnut je kratak prikaz nastanka udarnog vala što ga proizvode avioni koji lete nadzvučnom brzinom.

Najveće dopune i promjene unesene su u drugu glavu u kojoj se govori o slušnoj akustici. Ukratko je izložena teorija putujućih valova na bazilarnoj membrani i kodiranje slušnog signala pulsnofrekvencijskim moduliranjem. Također, opisana su novija otkrića na području binauralnog lokaliziranja. Na kraju su dodana poglavlja

o vremenskim konstantama sluha, o osjetljivosti sluha na razna izobličenja, te o ultrazvučnom orijentiranju nekih životinja.

U glavi o govoru i muzici (glava treća) našle su mjesto dopune o sintetičkom govoru i o stereofonijskom i kvadrofonijskom prijenosu glazbe.

U glavi četvrtoj koja se bavi akustikom prostorija valja posebno upozoriti na dopunu u poglavlju o akustičkom projektiranju (o dvorani Philharmonic Hall u New Yorku) i na proširenje opisa dvorane Royal Festival Hall u Londonu. Među primjere i opise izvedenih prostorija dodatno su uvrštene tri zagrebačke dvorane, i to koncertna dvorana Hrvatskog glazbenog zavoda, koncertna dvorana „Vatroslav Lisinski" i velika dvorana u Domu sportova.

U petoj glavi koja sadržava problematiku apsorpcijskih materijala i apsorpcijskih konstrukcija dodatno su obrađene gluha i odječna komora.

U novije se vrijeme zvučna izolacija pregrada ocjenjuje i izračunava uz pomoć normiranih (standardnih) karakteristika. Stoga je u glavi šestoj koja obuhvaća problematiku izolacije od buke, iznesen postupak određivanja iznosa zvučne izolacije pregradnih zidova i stropova u stanovima na temelju takvih krivulja.

Povećan je također broj priloga na kraju knjige.

Pored navedenih, u knjigu su unesene i mnoge kratke dopune u tekstu i u podnožnim bilješkama, kao i sažeti povijesni prikazi o nekim znanstvenim dostignućima. Stoga ovo izdanje pruža čitaocu mnogo više podataka iz pojedinih znanstvenih područja nego što ih je sadržavalo prvo izdanje.

Zagreb, prosinca 1977.

Autor

SADRŽAJ

Glava prva

FIZIKALNI TEMELJI AKUSTIKE

1.1. Osnovni pojmovi 1
1.1.1. Što je zvuk 1
1.1.2. Priroda zvučnog vala 2
1.1.3. Brzina širenja zvuka 4
1.1.4. Frekvencija 6
1.1.5. Valna duljina 7
1.1.6. Zvučni tlak 8
1.1.7. Titrajna brzina i pomak čestica 10
1.1.8. Zvučni intenzitet 10
1.1.9. Gustoća zvučne energije 11
1.1.10. Zvučna snaga 12
1.1.11. Decibel 12
1.1.12. Razina zvučnog tlaka, zvučnog intenziteta i zvučne snage 13
1.1.13. Zvučni spektar 14

1.2. Pojave koje prate širenje zvuka 20
1.2.1. Refleksija zvuka 20
1.2.2. Difrakcija zvučnog vala 22
1.2.3. Refrakcija zvučnog vala 23
1.2.4. Apsorpcija zvuka 26
1.2.5. Prijelaz zvučne energije kroz krute tvari 27
1.2.6. Dopplerov efekt 28
1.2.7. Stojni valovi 28
1.2.8. Treptajni valovi 29
1.2.9. Usmjerenost zvučnog izvora 30

Glava druga

SLUŠNA AKUSTIKA

2.1. Uho — izvanredno osjetljiv i univerzalan instrument 31

2.2. Građa uha i slušni proces 31
2.2.1. Građa uha 31
2.2.2. Slušni proces 37

2.3. Svojstva sluha 41
2.3.1. Pragovi sluha 41
2.3.2. Glasnoća 46
2.3.3. Prag razlikovanja zvučnog intenziteta 50
2.3.4. Izračunavanje razine glasnoće 51
2.3.5. Mjerenje razine glasnoće 54
2.3.6. Štetna i opasna buka 55
2.3.7. Visina tona 56
2.3.8. Prag razlikovanja frekvencije 59
2.3.9. Treptaji i subjektivni tonovi 59
2.3.10. Maskiranje i prekrivanje zvukova 61
2.3.11. Binauralno lokaliziranje 65
2.3.12. Vremenske konstante uha 69
2.3.13. Osjetljivost sluha na amplitudna, harmonička i fazna izobličenja 71
2.3.14. Ultrazvučno prostorno orijentiranje u nekih životinja 72

Glava treća

GOVOR I MUZIKA

3.1. Govor 76
3.1.1. Organ za govor 76
3.1.2. Govorni mehanizam 77
3.1.3. Karakteristike govornog zvuka 72
3.1.4. Zvučna snaga govora 82

3.2. Muzika 84
3.2.1. Karakteristike muzičkog zvuka 84
3.2.2. Dinamika 88
3.2.3. Zvučna snaga instrumenata 89
3.2.4. Reprodukcija glazbe 91

Glava četvrta

AKUSTIKA PROSTORIJA

4.1. Uvod 93

4.2. Volumen 95

4.3. Oblik 97
4.3.1. Zvučni proces u prostoriji paralelepipedna oblika 97
4.3.2. Plan poda 101
4.3.3. Izdizanje izvora zvuka i sjedala 104
4.3.4. Visina i oblik stropa 105
4.3.5. Reflektori zvuka 109
4.3.6. Jeka i flater-jeka 111
4.3.7. Difuzori 115

4.4. Odjek 116
4.4.1. Dozvuk i odjek 116
4.4.2. Izračunavanje vremena odjeka 119
4.4.3. Eyringova i Millingtonova formula 123
4.4.4. Apsorpcija zvuka u atmosferi 126
4.4.5. Odjek je zvučno istitravanje na prirodnim frekvencijama prostorije 127

4.5. **Optimalan odjek** 131
4.5.1. Govorna akustika prostorija 131
4.5.2. Muzička akustika prostorija 133
4.5.3. Frekvencijska karakteristika odjeka 136
4.5.4. Primjeri koeficijenta apsorpcije 139
4.5.5. Primjer proračunavanja vremena odjeka 144

4.6. **Prostorije raznih veličina imaju svoje specifične akustičke probleme** 140

4.7. **Električki i akustički spojene prostorije** 145

4.8. **Mjerenje akustičke kvalitete prostorija** 146
4.8.1. Mjerenje vremena odjeka 146
4.8.2. Snimanje karakteristike odjeka uz kontinuirano promjenljivu frekvenciju 153
4.8.3. Mjerenje raspodjele zvučne energije 154
4.8.4. Mjerenje usmjerne raspodjele zvučnih refleksija ili usmjerne difuznosti 155
4.8.5. Oscilografiranje direktnog i reflektiranog zvuka 155
4.8.6. Ispitni koncerti 156

4.9. **Metode akustičkog projektiranja** 157
4.9.1. Metoda crtanja zraka i čela zvučnih valova 159
4.9.2. Metoda valova na vodi 160
4.9.3. Metoda s električkom iskrom 162
4.9.4. Optička metoda 162
4.9.5. Ultrazvučna metoda 163

4.10. **Primjeri izvedenih prostorija** 164
4.10.1. Školska soba 164
4.10.2. Predavaonica 164
4.10.3. Koncertna dvorana 165
4.10.4. Kazališna dvorana 169
4.10.5. Koncertna dvorana Hrvatskog glazbenog zavoda 171
4.10.6. Koncertna dvorana „Vatroslav Lisinski" 173
4.10.7. Sportska dvorana 175

Glava peta

APSORPCIJSKI MATERIJALI I APSORPCIJSKE KONSTRUKCIJE

5.1. **Porozni apsorberi** 180

5.2. **Membranski apsorberi** 188

5.3. **Rezonatorski apsorberi** 192
5.3.1. Pojedinačni rezonatori 192
5.3.2. Spojeni rezonatorski sistemi ili panelni rezonatori 195
5.3.3. Rezonatori s rasporom 199

5.4. **Akustičke mjerne prostorije** 201
5.4.1. Gluha komora 201
5.4.2. Odječna komora 205

5.5. **Mjerenje koeficijenta apsorpcije** 206
5.5.1. Cijevna metoda 206
5.5.2. Metoda odječne komore 208

Glava šesta

IZOLACIJA OD BUKE

6.1. Tehnički napredak i buka 211

6.2. Štetno djelovanje buke 213

6.3. Osjetljivost na potresanje 217

6.4. Mjere i sredstva protiv buke 219

6.5. Prolazak buke kroz razdjelne zidove 222

6.5.1. Izračunavanje zvučne izolacije 224
6.5.2. Jednostavan neporozan zid 228
6.5.3. Jednostavan porozan zid 233
6.5.4. Dvostruk neporozan zid 233
6.5.5. Prolazak zvuka kroz male otvore 237
6.5.6. Vrata i prozori 238
6.5.7. Mjerenje zvučnog prigušivanja pregrade 242
6.5.8. Osnovna pravila građevinske akustike 245
6.5.9. Prigušivanje u ventilacijskim kanalima 246
6.5.10. Mjerenje zvučne izolacije stropne pregrade 248

6.6. Vibracije 254

PRILOG 1
Izvod formule za struju zvučne energije kroz jedinicu površine 257

PRILOG 2
Izvod formule za srednji slobodni put 258

PRILOG 3
Izvod formule za vrijeme odjeka polazeći od apsorpcije atmosfere 259

PRILOG 4
Određivanje realne i imaginarne komponente specifične akustičke impedancije apsorbera pomoću Smithova dijagrama 261

PRILOG 5
Približno proračunavanje zvučnog tlaka u poluodječnoj prostoriji 263

PRILOG 6
Određivanje graničnih vrijednosti za pojedinu vrstu buke na temelju N-krivulja 65

PRILOG 7
Prijelaz s terenog spektra na oktavni 267

PRILOG 8
Oktave 268

PRILOG 9
Preporučene frekvencije 269

PRILOG 10
Tablica decibela 270

PRILOG 11
Tablica muzičkih frekvencija 272

POPIS OZNAKA UPOTRIJEBLJENIH U FORMULAMA 273
LITERATURA 276
ABECEDNO KAZALO 279

Od istog autora:

TRANSFORMATORI I PRIGUŠNICE, III izdanje, *Tehnička knjiga*, Zagreb, 1966.

NEGATIVNA REAKCIJA U TONFREKVENTNOJ TEHNICI, *Radio-stanica Zagreb*, Zagreb, 1957.

MAGNETSKO SNIMANJE ZVUKA, II izdanje, *Tehnička knjiga*, Zagreb, 1968.

UVOD U ELEKTROTEHNIKU I ELEKTRONIKU, II izdanje, *Školska knjiga*, Zagreb, 1977.

MIKROFONI, *Tehnička knjiga*, Zagreb, 1969.

TRANZISTORSKA AUDIOPOJAČALA, II izdanje, *Školska knjiga*, Zagreb, 1977.

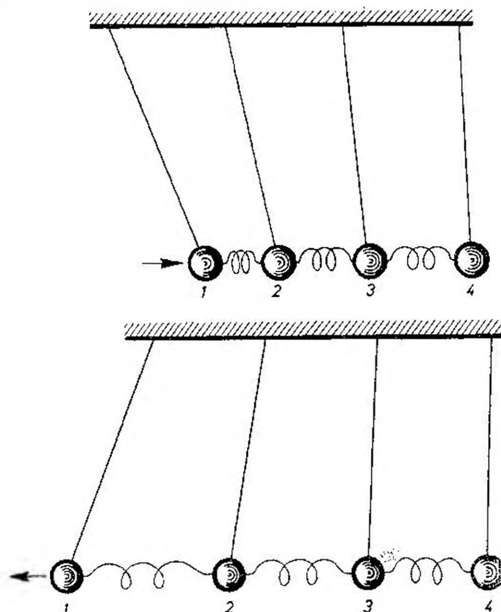
FIZIKALNI TEMELJI AKUSTIKE

1.1. OSNOVNI POJMOVI

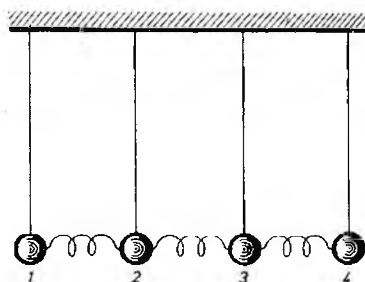
1.1.1. Što je zvuk

Zvukom se u užem smislu značenja te riječi naziva *sve ono što čujemo, što zamjećujemo sluhom.* Prema fizikalnoj definiciji *zvuk je titranje u plinovitim, tekućim i krutim elastičnim tvarima.* Možemo također reći da se *zvuk sastoji od ritmičkog njihanja molekula koje u njihov ravnotežni položaj vraćaju međumolekularne elastične sile.*

Pojedine čestice neke tvari međusobno su vezane elastičnim silama. Pomak jedne čestice, ili jednog dijela te sredine, prenijet će se preko elastičnih veza na okolne čestice, ili na okolne dijelove. Tako će se početni pomak postupno prenijeti na cijelu sredinu. Sl. 1.1. prikazuje model tvari u kojoj se širi poremećaj. Ako se kuglica 1 pomakne udesno, prenijet će se taj pomak i na kuglice 2, 3 i 4. Gibanje kuglice 1 lijevo-desno potaknut će postupno i ostale kuglice na takvo gibanje. No, to se neće odvijati sinkrono, nego sa stanovitim vremenskim zakašnjenjem, pa će se kuglice približavati i udaljivati kao na sl. 1.2. Nastat će, dakle, valno gibanje, širenje pomaka stanovitom brzinom.

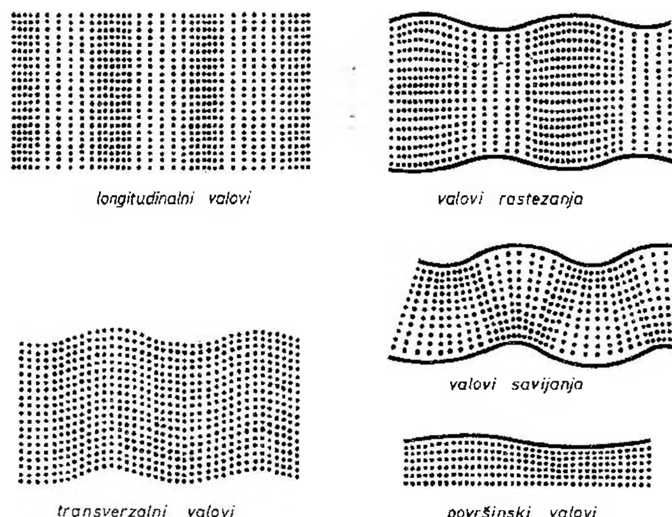


Sl. 1.2. Pomakom kuglice 1 udesno (gornja slika) stegne se opruga između kuglica 1 i 2 i gibanje se prenese na kuglicu 2, a od nje na jednak način na kuglicu 3, i tako redom na sve ostale kuglice. Modelom se udesno širi val zgušćivanja kuglica. Pomakom kuglice 1 ulijevo (donja slika) rastegne se opruga između kuglica 1 i 2 i pomak prenese na kuglicu 2, a odatle na isti način na kuglicu 3, itd. Modelom se udesno širi val razrjeđivanja kuglica.



Sl. 1.1. Mehanički model kojim se može prikazati kako nastaju longitudinalni valovi

Valovi koji se pojavljuju zbog titranja čestica u smjeru kojim se širi zvuk nazivaju se *longitudinalnim valovima*. Ako čestice titraju poprečno, okomito na smjer širenja zvuka, dobivaju se *transverzalni valovi*. U pločama i štapovima valovi mogu biti i druge vrste, kao *valovi savijanja i uvijanja*, *valovi rastezanja i površinski (Rayleighovi) valovi* (sl. 1.3).



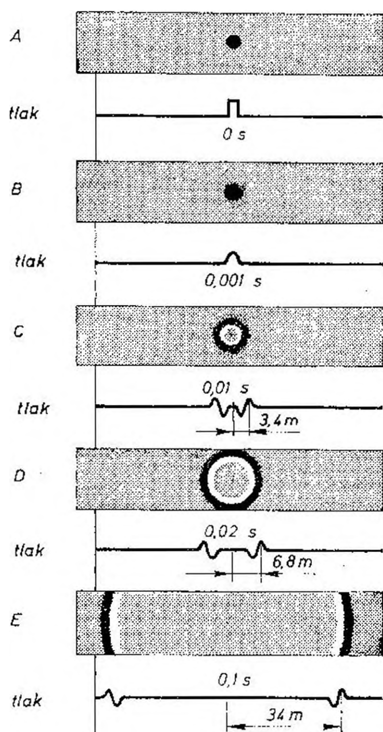
Sl. 1.3. Vrste valova u čvrstim tijelima

Riječ zvuk ima dva značenja: *subjektivno* ili *psihološko* i *objektivno* ili *fizikalno*. U prvom smislu zvuk je vezan za slušni osjet, a u drugome je to energija koja se širi i onda kad nema uha koje bi je otkrilo. Za nas je u ovoj knjizi važno samo prvo značenje. U arhitektonskoj se akustici razmatraju zvučne pojave koje čuje normalno uho, a i konačan sud o akustičkoj kvaliteti neke prostorije donosi se na temelju slušanja.

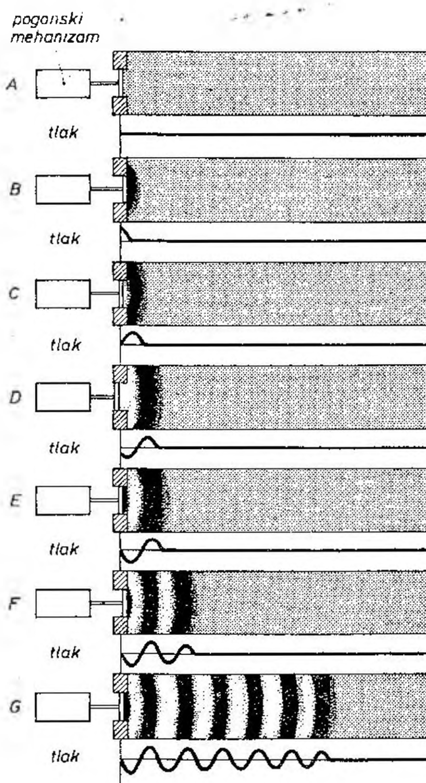
1.1.2. Priroda zvučnog vala

Kako nastaje zvučni val i kako se širi, možemo vidjeti iz prikaza na sl. 1.4. Tu je zvučni val nastao rasprsnućem malog balona. Slika *A* prikazuje stanje dok još balon nije eksplodirao. Posebnim se dijagramom predočuje tlak zraka. U početku vlada u balonu povećan tlak, dok je okolni zrak miran. Poslije eksplozije, što prikazuje slika *B*, tlak se počinje širiti na sve strane. Nakon jedne stotinke sekunde val je prešao put nešto veći od tri metra. Na slici *C*, gdje se vidi taj moment, zapaža se da je osim zgušćenja čestica zraka i tlaka višega od atmosferskog nastalo i njihovo razrjeđenje, uz pojavu tlaka nižega od onoga normalnog, atmosferskog. Slika *D*, na kojoj je stanje dvije stotinke sekunde nakon što se balon rasprsnuo, razlikuje se od prethodne samo u tome što je val, prešavši dulji put, oslabio, pa je negativna i pozitivna vršna vrijednost tlaka manja. To pogotovu vrijedi za sliku *E*, sa stanjem poslije jedne desetine sekunde.

Tijelo koje titra proizvodi u okolnoj atmosferi zvučne valove. Jedno je takvo tijelo ploča na sl. 1.5, koju na titranje prisiljava pogonski mehanizam. Svaki njezin titraj proizvede jedan zvučni val. Kako titranje traje kontinuirano, valovi slijede jedan za drugim i šire se u prostor ispred ploče (dakako i u onaj iza nje, samo se to na slici ne vidi). Iz dijagrama tlaka zapaža se kako on opada s udaljivanjem vala od ploče.



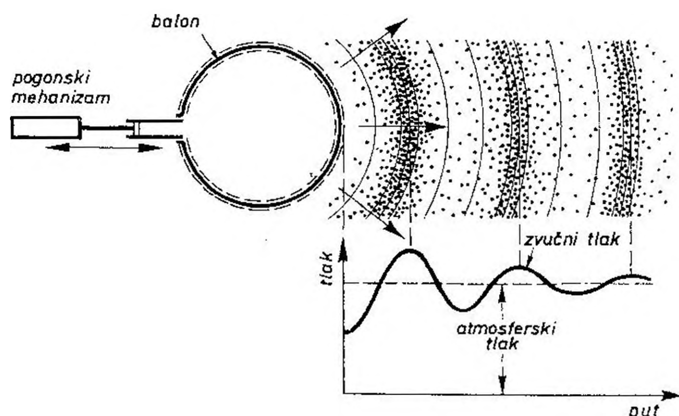
Sl. 1.4. Širenje zvučnog vala (impulsa) nastaloga eksplozijom malog balona. Ispod svake slike naznačeno je vrijeme što je proteklo od časa eksplozije i duljina puta koju je zvučni val prevalio. Dijagram prikazuje zvučni tlak u pojedinom trenutku.



Sl. 1.5. Širenje zvučnog vala nastaloga osciliranjem stapa. Dijagramom je prikazan zvučni tlak.

Kad teorijski proučavaju osobine zvučnih valova, akustičari se služe posebnim modelima. Teorija takvih idealnih odašiljača zvuka daje egzaktne i pregledne rezultate koji s većom ili manjom približnošću odgovaraju realnim odašiljačima, kao što je npr. zvučnik. Jedan od takvih zamišljenih odašiljača je dišuća ili pulzirajuća

lopta. To je balon kojemu se polumjer periodično povećava i smanjuje. Zbog promjene njegova volumena mijenja se pritisak na okolni zrak. Te se promjene šire u smjeru radijusa brzinom zvuka u okolni prostor (sl. 1.6).



Sl. 1.6. „Dišuća" lopta kao izvor zvučnih valova

1.1.3. Brzina širenja zvuka

Zvuk se širi mnogo sporije od svjetlosti. Iz iskustva znamo da gledajući iz veće udaljenosti drvosječu, udarac sjekire najprije vidimo, a tek naknadno ga čujemo. Brzina širenja zvuka u zraku ovisi o njegovoj gustoći ϱ_0, o atmosferskom tlaku p_0 i o konstanti γ, koja daje odnos specifične topline zraka uz konstantan tlak prema onoj uz konstantan volumen. Konstanta γ pojavljuje se ovdje zato što je širenje zvuka adijabatski proces, a to znači da se toplina koja nastaje za vrijeme zgušćivanja zraka ne može zbog brzine procesa odvesti.

Brzina kojom se širi zvuk u zraku (ili u plinovima općenito) može se izračunati prema formuli:

$$c = \sqrt{\frac{p_0 \cdot \gamma}{\varrho_0}} \qquad (1.1)$$

Za zrak je $\gamma = 1{,}4$. S porastom nadmorske visine sve je manji atmosferski tlak p_0, no isto tako i gustoća zraka, odnosno njegova specifična težina ϱ_0. Zato promjena atmosferskog tlaka neznatno utječe na brzinu zvuka. Naprotiv, o temperaturi brzina zvuka vrlo mnogo ovisi. To približno izražava formula:

$$c = 331{,}4 + 0{,}6\,t\ \mathrm{(m/s)} \qquad (1.2)$$

gdje je t temperatura zraka u °C. Sa svakim stupnjem opadanja ili porasta temperature brzina se zvuka smanji ili poveća nešto više od pola metra. Pri normalnoj sobnoj temperaturi od 20 °C brzina zvuka u zraku iznosi 343 m/s, a zimi uz temperaturu od — 20 °C padne na 319 m/s.

Brzina zvuka u zraku ovisna je o postotku vlage. Prema mjerenjima što ih je u laboratorijskim uvjetima proveo *C. M. Harris* na frekvencijama od 293 Hz

i 505 Hz, uz normalni tlak i na temperaturi od 20 °C, brzina zvuka se dodavanjem vlage najprije smanjuje. Najnižu vrijednost ima uz relativnu vlažnost od 14%, i to za 0,5‰ nižu od one koju ima u potpuno suhom zraku. Daljim povećavanjem vlažnosti brzina zvuka raste. U području relativne vlažnosti preko 30% porast je linearan. Uz 100%-tnu relativnu vlažnost brzina zvuka je za 3,3‰ veća nego u zraku bez vlage. Iako se promjenom relativne vlažnosti brzina zvuka ne mijenja mnogo, mogu takve promjene brzine znatno utjecati na smjer zvučnih valova prilikom njihova širenja na velike udaljenosti.

Iznad površine vode zrak je zasićen vlagom pa se zvučni valovi usmjeruju prema gore.

Sve do sedamnaestog stoljeća nije bilo sa sigurnošću utvrđeno da se zvuk širi kroz zrak. Jednostavnim pokusom — zvoncem u hermetički zatvorenoj posudi iz koje je bio isisan zrak — *Robert Boyle* je 1660. godine dokazao da se zvuk ne može širiti kroz vakuum.

Brzinu zvuka u zraku prvi je pokušao izmjeriti francuski matematičar *Marin Merssenne* (1640). On je izračunao vrijeme za koje se jeka vrati do izvora zvuka, uz poznatu udaljenost između tog mjesta i plohe od koje se zvuk reflektirao. Njegova je procjena bila da se zvuk širi brzinom od 316 m u sekundi. Talijanski istraživači *Borelli* i *Viviani* poslužili su se 1660. godine za tu svrhu topovskim praskom. Tu je metodu 1708. godine usavršio Englez *William Derham*. On je topovski prasak slušao na crkvenom tornju, a top je bio na brdu izvan grada na udaljenosti od 18 km. Ponavljajući pokus više puta i uzimajući u račun smjer vjetra, Derham je kao srednju vrijednost dobio brzinu od 343 m u sekundi, što je vrlo blizu vrijednosti utvrđenoj današnjim modernim metodama pri temperaturi od 20 °C.

Dat ćemo brzine zvuka za neke plinove (pri temperaturi od 20 °C i uz atmosferski tlak od 1 bar):

Vodik	1 270 m/s
Kisik	317 „
Dušik	338 „
Helij	971 „

Brzina zvuka u tekućinama ovisi o njihovoj kompresibilnosti K i gustoći ϱ_0. Taj odnos daje formula:

$$c = \sqrt{\frac{1}{K \cdot \varrho_0}} \tag{1.3}$$

Evo podataka za nekoliko tekućina:

Voda, 10 °C	1 440 m/s
Voda, 21,5 °C	1 484 „
Voda morska, 3,6% soli, 15 °C	1 505 „
Glicerin, 20 °C	1 920 „
Petrolej, 15 °C	1 330 „

Za brzinu zvuka u krutima tijelima vrijedi formula:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\varrho_0}} \tag{1.4}$$

E je modul elastičnosti, a ϱ_0 specifična težina. Dat ćemo brzine zvuka u nekim krutim tvarima:

Željezo	5000 m/s
Aluminij	5105 „
Srebro	2700 „
Olovo	1300 „
Staklo	3490 „
Jelovo drvo	3320 „
Pluto	500 „
Guma	40—150 „

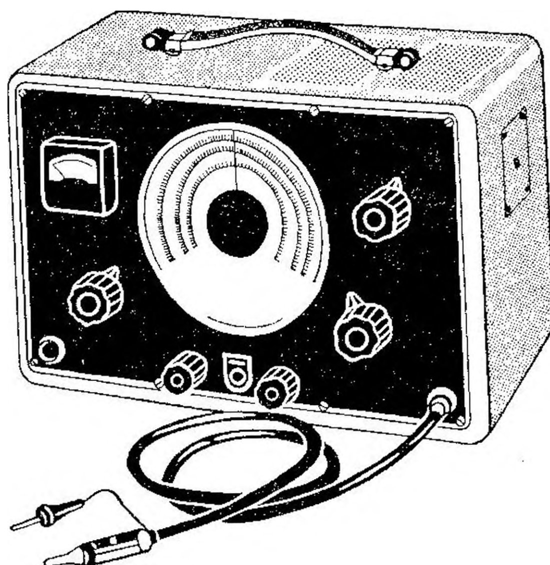
Vrijednosti se odnose na širenje longitudinalnim valovima.*

Uz vrlo visoke zvučne tlakove koji nastaju npr. pri jakim eksplozijama, brzina zvuka u zraku znatno je veća od normalne. Izmjerene su i do tri puta veće vrijednosti. No, tolika je brzina u blizini izvora. Nakon desetak kilometara puta brzina se zvučnog vala spusti na normalnu. Porast brzine uz visok zvučni tlak uzrok je da se izobličuje valni oblik. Kad je, naime, zvučni tlak izrazito visok, ne može se zanemariti titrajna brzina zračnih čestica prema brzini kojom se širi val. U područjima povećanoga (pozitivnog) zračnog tlaka čestice se gibaju u smjeru prostiranja pa je brzina veća. Suprotno tome, u zoni smanjenoga (negativnog) zračnog tlaka čestice su suprotnog smjera, pa je i brzina prostiranja manja. Različitu brzinu širenja uzrokuje još i to što se zbog porasta tlaka povisuje i temperatura zraka i, obratno, uz pad tlaka temperatura postaje niža. To dodatno povećava brzinu prostiranja u području pozitivnog poluvala zvučnog tlaka, a smanjuje u području negativnog poluvala. Sinusoidni zvučni val, putujući različitom brzinom, izobliči se u približno pilasti. Približavanje takvu obliku raste s udaljivanjem vala od izvora. Nakon određene duljine puta val dobiva gotovo okomito čelo. Takav je npr. udarni val aviona u nadzvučnom letu. Konačna stabilnost valnog oblika održava se ravnotežom koja nastaje kad se prestanu stvarati harmonički članovi zbog porasta apsorpcije na visokim harmoničkim frekvencijama.

1.1.4. Frekvencija

Broj titraja u sekundi naziva se frekvencijom i izražava u hercima (Hz) i u tisućama herca ili kilohercima (kHz).

Čovječje uho može čuti frekvencije od 16 Hz do 20 kHz. Ono, dakle, ne zamjećuje kao zvuk one zvučne valove kojih do njega stiže manje od 16 u sekundi ili u većem broju od 20000 u sekundi. Frekvencije niže od 16 Hz uho ne čuje kao tonove, već ih osjeća kao potresanje. To se područje frekvencija naziva *infrazvukom*, a ono s frekvencijama iznad 20000 Hz je *ultrazvuk*.



Sl. 1.7. Generator napona i struja tonskih frekvencija ili tongenerator (Philips)

* Najveću brzinu širenja u nekom materijalu imaju longitudinalni valovi.

Sluh nekih životinja prilagođen je za slušanje zvuka mnogo viših frekvencija nego što ih čuje čovjek. Tako pas reagira na frekvencije do 50 kHz, mačka do 65 kHz, šišmiš do 120 kHz, a dupin i leptir do 150 kHz.

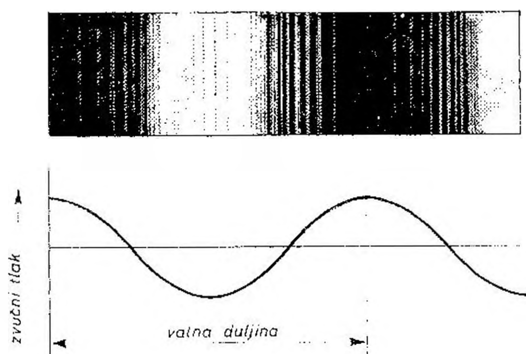
U tehničkoj se akustici za mjerne svrhe kao proizvođač tonova određene frekvencije upotrebljava tongenerator povezan sa zvučnikom. Sl. 1.7. prikazuje takav aparat. Uz pomoć skale na tom aparatu namjesti se ton potrebne frekvencije, a regulatorom se može ugoditi glasnoća tona.

1.1.5. Valna duljina

Razmak između dvije susjedne točke najvećeg zgušnjenja, ili između dvije točke najvećeg razrjeđenja sredine u kojoj se zvučni val širi, naziva se *valnom duljinom* (sl. 1.8).

Na putu što ga zvuk prevali u jednoj sekundi ima upravo toliko valova (ili valnih duljina) kolika mu je frekvencija. Prema tome, valna se duljina može izračunati iz brzine širenja zvuka i frekvencije:

$$\lambda = \frac{c}{f} \qquad (1.5)$$



Sl. 1.8. Duljina zvučnog vala je razmak između dva susjedna najveća zgušnjenja ili između dva susjedna najveća razrjeđenja

U akustičkom je području odnos valnih duljina, isto kao i frekvencija, vrlo velik. Frekvenciji od 16 Hz pripada valna duljina nešto veća od 20 m, a valna je duljina na najvišoj čujnoj frekvenciji od 20000 Hz nešto manja od 2 cm.

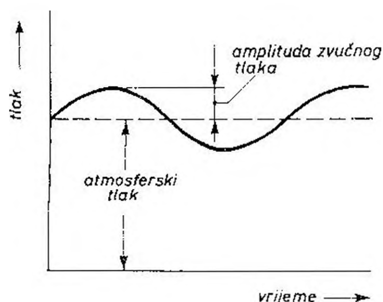
Jedan od načina na koji se može otkriti da je negdje, na velikoj udaljenosti, izvedena pokusna eksplozija atomske bombe sastoji se u tome da se pomoću specijalnog mikrofona primaju zvučni valovi vrlo niskih infrazvučnih frekvencija. Naime, valovi se samo takvih frekvencija mogu proširiti na velike udaljenosti jer one viših frekvencija apsorbira Zemljina atmosfera. Takvim mikrofonom primaju se frekvencije kojima jedan titraj traje i po tri minute. To odgovara valnoj duljini većoj od 60 km!

1.1.6. Zvučni tlak

Dok se zvučni val širi, zvučni se tlak superponira atmosferskom tlaku, tako da u jednoj poluperiodi ukupni tlak poraste iznad atmosferskoga, a u idućoj se poluperiodi snizi ispod njegove vrijednosti (sl. 1.9). Pod efektivnim zvučnim tlakom razumijeva se amplituda zvučnog tlaka p_m smanjena $\sqrt{2}$ puta:

$$p = \frac{p_m}{\sqrt{2}} \qquad (1.6)$$

Kad se govori o zvučnom tlaku općenito, misli se na efektivni zvučni tlak.



Sl. 1.9. Zvučni tlak je izmjenični tlak superponiran atmosferskom tlaku.

Čovječje uho može osjetiti izvanredno niske zvučne tlakove. Na pragu čujnosti i u području frekvencija u kojem je uho najosjetljivije, ono zamjećuje zvučne tlakove koji su 10^{-10} puta niži od atmosferskog tlaka. Oni koji su viši od 10^{-4} atmosferskog tlaka u uhu izazivaju bol.

Jedinica za mjerenje zvučnog tlaka je *paskal** (kratica: *Pa*). Jedan paskal jednak je jednom njutnu po kvadratnom metru (1 Pa = 1 N/m²). Često se upotrebljava i jedinica *mikrobar*** (kratica: μbar), koja odgovara jednoj desetinki paskala ili njutna po kvadratnom metru (1 μbar = 0,1 Pa = 0,1 N/m²). Atmosferski tlak iznosi oko 10^5 Pa (ili 10^5 N/m²), ili oko 10^6 μbar (= 1 bar).

U praktičkoj se akustici od veličina zvučnog polja mjeri samo zvučni tlak, zato što je njegovo mjerenje jednostavno i što uho zvuk osjeća kao promjene tlaka. Iz podatka o tlaku mogu se izračunati ostale veličine zvučnog polja.

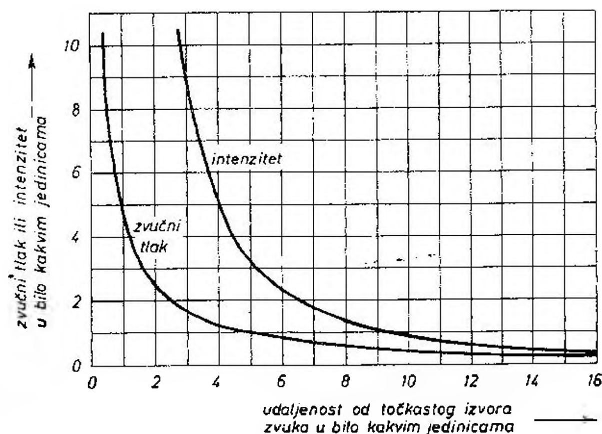
S porastom udaljenosti od izvora zvuka opada zvučni tlak obrnuto razmjerno udaljenosti (sl. 1.10). To vrijedi za „točkaste" izvore zvuka, kao što su (približno) usta ili zvučnik, koji proizvode zvučne valove praktički kuglasta oblika. Objašnjenje za tu pojavu vidi se na sl. 1.11. Površina kugle raste s kvadratom polumjera i zato zvučni intenzitet u kuglastu valu opada s kvadratom udaljenosti od izvora.

Uređaj za tehničko mjerenje zvučnog tlaka vidimo na sl. 1.12. Takav se uređaj u principu sastoji od mikrofona, pojačala i instrumenta s kazaljkom baždarenoga u jedinicama zvučnog tlaka. Vrijednost zvučnog tlaka očitava se izravno na skali instrumenta.

---

* U čast *Blaisea Pascala* (1623—1662), francuskog filozofa, matematičara i fizičara, koji je kao fizičar istraživao tlak plinova i tekućina.

** Jedan mikrobar približno izražava zvučni tlak koji nastaje pri običnom razgovoru na udaljenosti od 30 cm ispred usta.



Sl. 1.10. Zvučni tlak opada obrnuto razmjerno s udaljenošću od izvora, a zvučni intenzitet obrnuto razmjerno s kvadratom udaljenosti.

točkasti izvor zvuka

zvučne ljuske

zvučni mlaz

9 S

4 S

S

I

I/4

I/9

r

2r

3r

Sl. 1.11. Slikovit prikaz opadanja intenziteta zvuka ovisno o udaljenosti od izvora

Sl. 1.12. Aparat za mjerenje zvučnog tlaka ili zvukomjer. On ima ugrađene filtre kojima se dobivaju krivulje A, B, C i D, pa se njime mjeri i razina buke.

1.1.7. Titrajna brzina i pomak čestica

Prilikom širenja zvučnog vala pojedine čestice zvuka titraju oko svoga srednjeg položaja. Pomak od položaja mirovanja izvode čestice stanovitom brzinom. Ona nije konstantna, već se mijenja od nule do neke maksimalne vrijednosti. Ako je riječ o sinusoidnome zvučnom valu, onda se i brzina čestica i njihov pomak mijenjaju po zakonu sinusoide. Efektivna brzina čestica ili efektivna titrajna brzina je $\sqrt{2}$ puta manja od amplitude titrajne brzine. Između (efektivnog) zvučnog tlaka p i (efektivne) titrajne brzine v vlada ovaj odnos:

$$p = \varrho_0 \cdot c \cdot v \tag{1.7}$$

Tu je ϱ_0 gustoća zraka, a c je brzina zvuka.

Umnožak gustoće zraka i brzine zvuka, dakle $\varrho_0 \cdot c$, naziva se *specifičnim akustičkim otporom*. Kod zraka taj otpor ima vrijednost od 410 N · s/m³. U akustici se on često izražava u jedinicama CGS-sustava, i tad iznosi 41 dyn.s/cm³ ili 41 rejl* (također 41 akustički om).

Titrajna brzina zračnih čestica relativno je malena. Uz zvučni tlak od 200 μbara — a to je granični tlak koji još nije opasan za uho — titrajna je brzina 5 cm/s. Radi usporedbe spomenimo da vjetar brzine od oko 100 cm/s osjećamo tek kao lagano strujanje.

Amplituda pomaka ili pomačna amplituda čestica a dobiva se iz odnosa:

$$a = \frac{v_m}{2\pi f} \tag{1.8}$$

gdje je v_m amplituda titrajne brzine, a f frekvencija zvuka.

I pomačna amplituda zračnih čestica relativno je malena. Uz spomenuti zvučni tlak od 200 μbara i na frekvenciji od 1 000 Hz pomačna amplituda iznosi manje od stotinke milimetra.

1.1.8. Zvučni intenzitet

U vezi sa titrajnom brzinom zvučni val sadrži kinetičku energiju, a s obzirom na zvučni tlak potencijalnu energiju. Zvučnim se valom, dakle, brzinom zvuka prenosi mehanička energija. Količina energije koja u jednoj sekundi prostruji kroz plohu od 1 m² postavljenu okomito na smjer širenja naziva se jakošću ili intenzitetom zvuka. Za intenzitet zvuka vrijedi:

$$I = p \cdot v \tag{1.9}$$

$$I = \frac{p^2}{\varrho_0 \cdot c} \tag{1.10}$$

$$I = v^2 \cdot \varrho_0 \cdot c \tag{1.11}$$

Budući da je za zrak $\varrho_0 \cdot c = 410$ N.s/m³, ili $\varrho_0 \cdot c = 41$ rejl, to će zvučni intenzitet biti:

$$I = \frac{p^2}{410} = 2{,}44 \cdot 10^{-3} \cdot p^2 \, (\mathrm{W/m^2}) \tag{1.12}$$

---

* Akustički otpor od 1 rejla ima ona sredina u kojoj zvučni tlak od 1 μbar proizvede titrajnu brzinu od 1 cm/s. Imenom *rejl* nazvana je jedinica u čast lorda *Rayleigha* (1842 - 1919), teoretičara akustike.

odnosno:

$$I = \frac{p^2}{410} \cdot 10^{-2} = 2{,}44 \cdot 10^{-5} \cdot p^2 \text{ (W/m}^2\text{)} \tag{1.13}$$

$$I = \frac{p^2}{41} \cdot 10^{-7} = 2{,}44 \cdot 10^{-9} \cdot p^2 \text{ (W/cm}^2\text{)} \tag{1.14}$$

U prvu formulu zvučni tlak p treba uvrstiti u paskalima, a u druge dvije u mikrobarima.

Startni raketni motori za međuplanetarna vozila, kao što je „Apollo", razvijaju izvanredno veliku zvučnu snagu. Ona je 0,6% ukupne snage i iznosi oko 50 MW. Zvučni tlak u blizini rakete penje se do $2 \cdot 10^4$ Pa, što odgovara zvučnoj jakosti od jednog megavata po kvadratnom metru.

Ako uho nije zaštićeno zvuk tolikog intenziteta probija bubnjić i uništava unutrašnje uho, uzrokuje grčeve pa čak i smrt.

U tablici 1.1. navedene su za neke zvučne tlakove odgovarajući zvučni intenziteti i titrajne brzine (uz 20 °C i 1 bar).

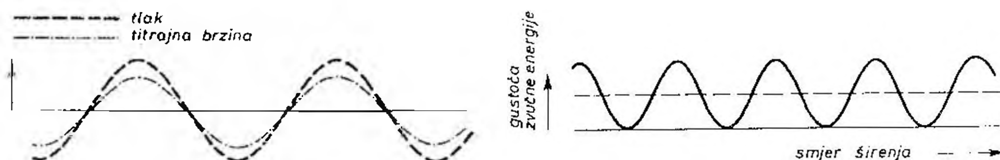
Tablica 1.1.

Zvučni tlak		Zvučni intenzitet	Titrajna brzina
Pa	μbar	μW/m²	mm/s
10^{-4}	10^{-3}	$2{,}44 \cdot 10^{-5}$	$2{,}44 \cdot 10^{-4}$
10^{-3}	10^{-2}	$2{,}44 \cdot 10^{-3}$	$2{,}44 \cdot 10^{-3}$
10^{-2}	10^{-1}	$2{,}44 \cdot 10^{-1}$	$2{,}44 \cdot 10^{-2}$
10^{-1}	1	24,4	$2{,}44 \cdot 10^{-1}$
1	10	2 440	2,44
10	10^2	$244 \cdot 10^3$	24,4

1.1.9. Gustoća zvučne energije

Energija zvučnog vala nije jednoliko raspoređena u prostoru. Ona je najveća u mjestima najvećeg tlaka i brzine, a jednaka je nuli ondje gdje su tlak i brzina jednaki nuli (sl. 1.13). U prostornoj se akustici pod *gustoćom zvučne energije* razumijeva *vremenska srednja vrijednost zvučne energije po* m³. Budući da se intenzitet zvuka odnosi na plohu od 1 m² i put što ga zvuk prevali u 1 s, dakle c m/s, gustoća se zvučne energije E dobiva iz odnosa:

$$E = \frac{I}{c} \tag{1.15}$$



Sl. 1.13. Trenutno stanje u prostornoj raspodjeli zvučnog tlaka, titrajne brzine i gustoće zvučne energije ravnog vala

Za zrak vrijedi:

$$E = 7{,}1 \cdot 10^{-6} \cdot p^2 \,(\mathrm{Ws/m^3}) \quad (1.16)$$

$$E = 7{,}1 \cdot 10^{-8} \cdot p^2 \,(\mathrm{Ws/m^3}) \quad (1.17)$$

$$E = 7{,}1 \cdot 10^{-14} \cdot p^2 \,(\mathrm{Ws/cm^3}) \quad (1.18)$$

Zvučni tlak p uvrštava se u prvu formulu u paskalima, a u druge dvije u mikrobarima.

1.1.10. Zvučna snaga

Pod zvučnom snagom P razumijeva se zvučna energija što u jednoj sekundi prostruji kroz plohu veličine S postavljenu okomito na smjer kojim se širi zvuk:

$$P = S \cdot p \cdot v = S \frac{p^2}{\varrho_0 c} \quad (1.19)$$

Za zrak, i uz tlak izražen u paskalima, vrijedi:

$$P = 2{,}44 \cdot 10^{-3} \cdot S \cdot p^2 \,(\mathrm{W}) \quad (1.20)$$

Ako je tlak izražen u mikrobarima, dobivamo:

$$P = 2{,}44 \cdot 10^{-5} \cdot S \cdot p^2 \,(\mathrm{W}) \quad (1.21)$$

$$P = 2{,}44 \cdot 10^{-9} \cdot S \cdot p^2 \,(\mathrm{W}) \quad (1.22)$$

U prve dvije formule površinu S valja uvrstiti u kvadratnim metrima, a u treću u kvadratnim centimetrima.

Treba napomenuti da u blizini izvora kuglastoga zvučnog vala nisu zvučni tlak i titrajna brzina u fazi, pa zbog toga u izrazima za akustički otpor, jakost zvuka, gustoću energije i zvučnu snagu valja fazne odnose uzeti u račun pomoću faktora $\cos \varphi$, gdje je φ fazni pomak. Kako je već na udaljenosti od izvora koja je jednaka valnoj duljini $\cos \varphi$ gotovo jednak jedinici, u formulama za praktičke potrebe on se najčešće može izostaviti.

Za neke izvore zvuka izrazit ćemo zvučnu snagu koju oni emitiraju u okolni prostor:

Normalan razgovor, srednja vrijednost	oko $7 \cdot 10^{-6}$ W
Vršna snaga ljudskog glasa	oko $2 \cdot 10^{-3}$ W
Violina (fortissimo)	oko 10^{-3} W
Klavir (fortissimo)	oko $2 \cdot 10^{-1}$ W
Truba (fortissimo)	oko $3 \cdot 10^{-1}$ W
Orgulje (fortissimo)	1—10 W
Bubanj (fortissimo)	oko 10 W
Veliki zvučnik (najveća snaga)	preko 10^2 W

Kako je malena snaga čovječjeg glasa, možemo vidjeti iz ovog primjera. Kad bi svi Zagrepčani, kojih ima oko 700000, govorili istodobno, ukupna proizvedena zvučna snaga iznosila bi $7 \cdot 10^5 \cdot 7 \cdot 10^{-6}$ = približno 5 W. Bila bi to, dakle, tri puta manja snaga od one koju troši najslabija žarulja za kućnu rasvjetu.

1.1.11. Decibel

U slušnoj su akustici omjeri zvučnih snaga i omjeri zvučnih tlakova vrlo veliki. Bol ili nelagodnost u uhu nastaje pri zvučnoj jakosti od 1 $\mathrm{W/m^2}$ (= 10^{-4} $\mathrm{W/cm^2}$). Na pragu čujnosti uho osjeti kao zvuk već zvučni intenzitet od 10^{-12} W (= 10^{-16} $\mathrm{W/cm^2}$). Ti se zvučni intenziteti odnose kao $10^{12} : 1$, što odgovara od-

nosu zvučnih tlakova $10^6 : 1$. Zbog tako velikih omjera, odnosno velikih brojeva, vrlo je praktično da se zvučne snage i tlakovi izražavaju logaritmom omjera.

Logaritam odnosa dviju snaga izražava se u *belima**. Iz praktičkih razloga prikladnije je za logaritamski odnos snaga upotrebljavati jedinicu deset puta manju od bela, a to je *decibel* (dB). Ako su I_1 i I_2 zvučni intenziteti, a n broj decibela koji naznačuje njihov odnos, onda možemo pisati:

$$n = 10 \log \frac{I_1}{I_2} \text{ (dB)} \tag{1.23}$$

Budući da je zvučni intenzitet razmjeran kvadratu zvučnog tlaka, odnosno kvadratu titrajne brzine, to se za odnos zvučnih tlakova ili za odnos titrajnih brzina broj decibela dobiva prema formuli:

$$n = 20 \log \frac{p_1}{p_2} = 20 \log \frac{v_1}{v_2} \text{ (dB)} \tag{1.24}$$

U tablici 1.2 navedeni su decibeli za neke odnose snaga i odnose tlakova.

Tablica 1.2.

Odnos snaga	Decibeli	Odnos zvučnih tlakova ili titrajnih brzina	Decibeli
1	0	1	0
2	3,0	2	6,0
3	4,8	3	9,5
4	6,0	4	12,0
5	7,0	5	14,0
6	7,8	6	15,6
7	8,5	7	16,9
8	9,0	8	18,1
9	9,5	9	19,1
10	10	10	20
100	20	100	40
1 000	30	1 000	60
10 000	40	10 000	80
100 000	50	100 000	100
1 000 000	60	1 000 000	120

Izneseni odnosi zvučnih intenziteta od $10^{12} : 1$ i zvučnih tlakova od $10^6 : 1$ iznose 120 dB. Prednost je, dakle, upotrebe decibela u tome što se računa mnogo manjim brojevima. No to nije sve. Kao što ćemo poslije vidjeti, neke važne osobine sluha vezane su upravo za logaritamski odnos.

1.1.12. Razina zvučnog tlaka, zvučnog intenziteta i zvučne snage

Odnos zvučnih tlakova ili zvučnih intenziteta izražen u decibelima ne omogućuje da se nađe njihov iznos. Da bi se to ostvarilo, potrebno je imati podatak o vrijednosti jedne od tih veličina. Međunarodnim dogovorom akustičara utvrđeno je da *referentni zvučni tlak* bude $2 \cdot 10^{-5}$ Pa ($= 2 \cdot 10^{-4}$ μbar ili 20 $\mu N/m^2$ = 20

* U čast *Grahama Bella* (1847—1922), izumitelja telefona.

μPa). Uz taj tlak zvučna jakost iznosi 10^{-12} W/m², pa je to vrijednost *referentnoga zvučnog intenziteta.* Izbor tih referentnih razina nije slučajan. To su zvučni tlak i zvučni intenzitet na pragu čujnosti mlada čovjeka zdrava sluha, i to na frekvenciji od 1 000 Hz. Referentni zvučni tlak od $2 \cdot 10^{-5}$ Pa i referentni zvučni intenzitet od 10^{-12} W/m² prema tome su *nulte razine tlaka i intenziteta.*

Iz razloženoga izlazi da se razina zvučnog tlaka dobiva iz izraza:

$$L_p = 20 \log \frac{p\,(\mathrm{Pa})}{2 \cdot 10^{-5}}\ (\mathrm{dB}) \qquad (1.25)$$

Ako je zvučni tlak izražen u mikrobarima, vrijedi:

$$L_p = 20 \log \frac{p\,(\mu\mathrm{bar})}{2 \cdot 10^{-4}}\ (\mathrm{dB}) \qquad (1.26)$$

Razina zvučnog intenziteta izračuna se na temelju izraza:

$$L_I = 10 \log \frac{I\,(\mathrm{W/m^2})}{10^{-12}}\ (\mathrm{dB}) \qquad (1.27)$$

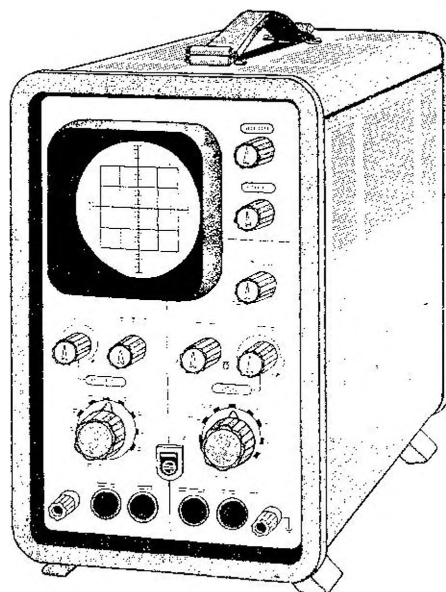
Ako je zvučni intenzitet izražen u W/cm², biti će:

$$L_I = 10 \log \frac{I\,(\mathrm{W/cm^2})}{10^{-16}}\ (\mathrm{dB}) \qquad (1.28)$$

Prije spomenutome zvučnom tlaku od $2 \cdot 10^4$ Pa (odjeljak 1.1.8), što ga proizvode startni raketni motori međuplanetarnog vozila *Apollo*, odgovara razina zvučnog tlaka od $20 \log 2 \cdot 10^4/(2 \cdot 10^{-5}) = 20 \log 10^9 = 180$ dB. Razina atmosferskog tlaka ima vrijednost od 194 dB.

Kao što se može govoriti o razini zvučnog tlaka i zvučnog intenziteta, tako je opravdan i pojam *razine zvučne snage. Referentna zvučna snaga* (ili *zvučna snaga nulte razine)* jest 10^{-12} W. Prema tome vrijedi:

$$L_P = 10 \log \frac{P\,(\mathrm{W})}{10^{-12}}\ (\mathrm{dB}) \qquad (1.29)$$

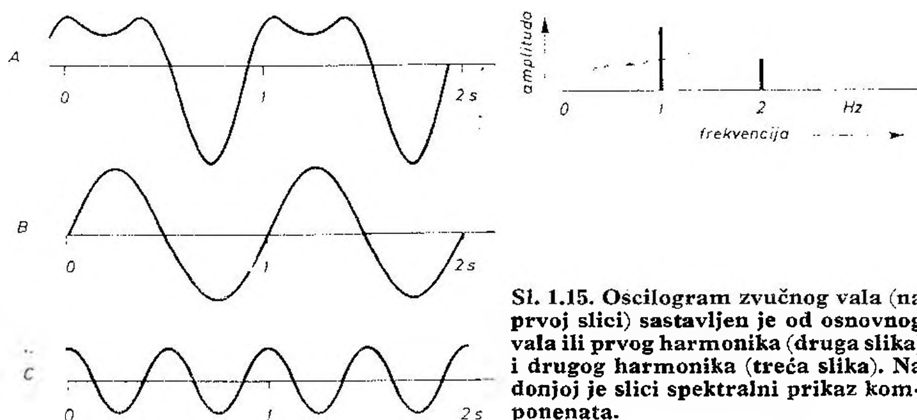


1.1.13. Zvučni spektar

Proučava li se neka zvučna pojava, prijeko je potrebno poznavati vremensku karakteristiku zvučnog tlaka. Ona se na jednostavan način dobiva pomoću osciloskopa (sl. 1.14). Svaki periodičan proces može se rastaviti na niz jednostavnih sinusoidnih titranja — *Fourierov red.* Slično se daju analizirati i neperiodični procesi — *Fourierov integral.*

Sl. 1.14. Katodni osciloskop (Philips)

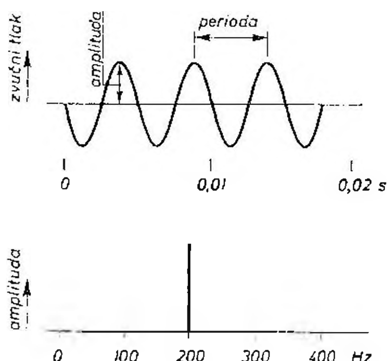
Po ugledu na optiku, i u akustici se pojedine sastavne komponente nekog zvuka prikazuju linijama. Mjestom linije na frekvencijskoj ljestvici označuje se frekvencija određene komponente tlaka, dok duljina linije predočuje njezinu amplitudu. Iz primjera na sl. 1.15. vidi se kako komponente zvučnog tlaka, koji ima oscilogram oblika pod *A*, izgledaju u vremenskom i spektralnom prikazu.



Sl. 1.15. Oscilogram zvučnog vala (na prvoj slici) sastavljen je od osnovnog vala ili prvog harmonika (druga slika) i drugog harmonika (treća slika). Na donjoj je slici spektralni prikaz komponenata.

Prema obliku zvučnog spektra dijelimo zvukove na tri vrste:

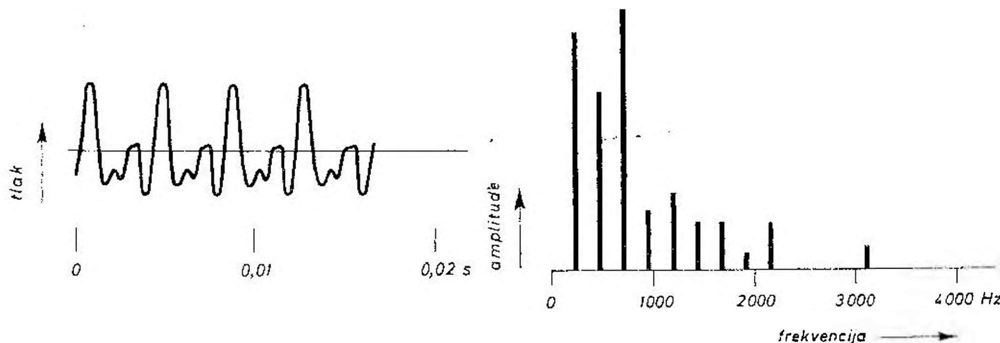
1. *Čisti ton* je jednostavno *sinusoidno* titranje. U spektralnom je prikazu to jedna linija na stanovitoj frekvenciji (sl. 1.16). Ovakvi tonovi gotovo uopće ne nastaju u prirodi, ali se u elektroakustici mnogo upotrebljavaju za mjerne svrhe.



Sl. 1.16. Sinusoidan zvučni tlak (čisti ton) u spektralnom je prikazu vertikalna linija.

2. *Muzički ton* sastoji se od *osnovnog tona* i manjeg ili većeg broja *harmoničkih tonova* (nadvalova). Harmonički tonovi uvijek su cjelobrojni višekratnici osnovnog tona (sl. 1.18). Amplituda osnovnog tona ne mora uvijek biti

veća od onih koje imaju druge komponente. Visinu tona, kako je čujemo uhom, određuje osnovni ton. Zanimljivo je da se ona ne mijenja ako se osnovni ton priguši, pa čak i onda kad se on potpuno isključi. Broj i jakost harmoničkih tonova određuje tonsku boju nekog glazbala.



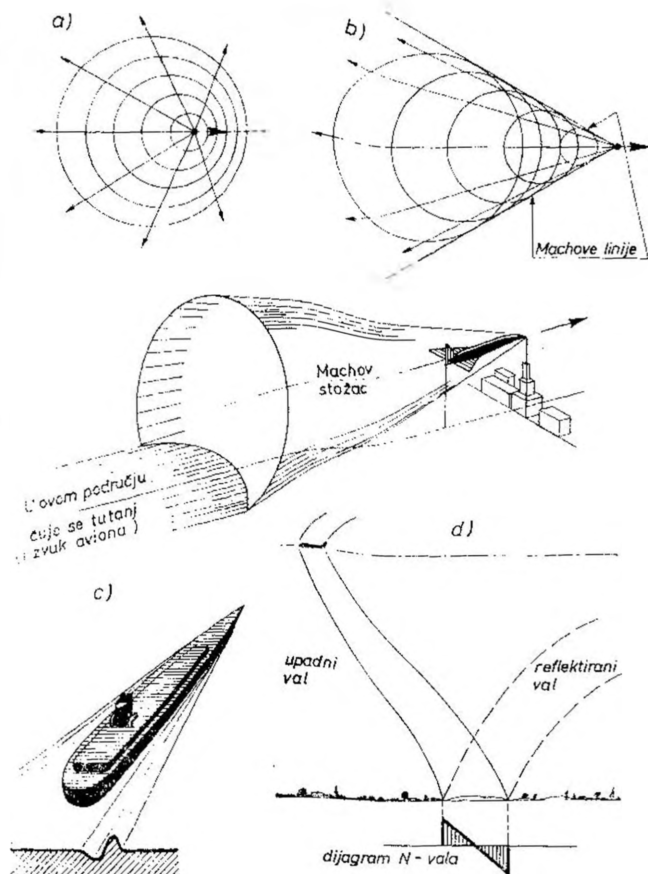
Sl. 1.17. Nesinusoidan periodičan zvučni tlak (ton violine) u spektralnom prikazu daje više vertikalnih linija raznih duljina, i to na frekvencijama koje su cjelobrojni višekratnici osnovne frekvencije.

3. *Šum* je nepravilno titranje u kojem nema *ni stalnih frekvencija ni stalnih amplituda.* Spektar šuma nije linijski, već *kontinuiran,* što znači da pojedini tonovi gusto ispunjuju cijelo jedno frekvencijsko područje (sl. 1.18).

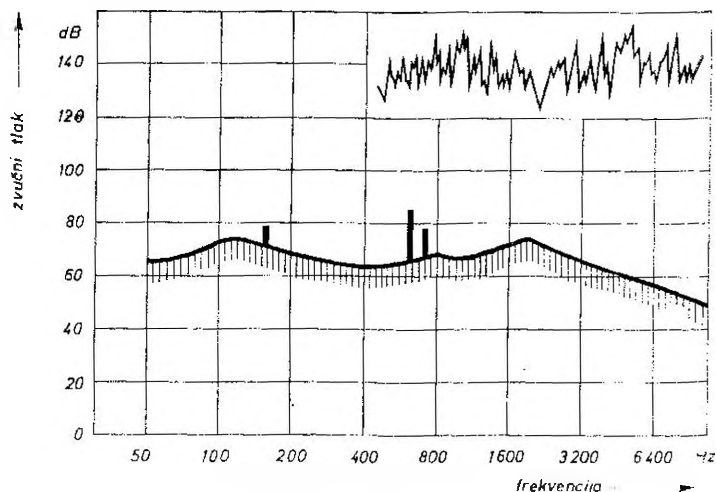
   Posebna vrsta šuma je *prasak.* To je vrlo kratkotrajna zvučna pojava *velike snage* i *strmog uspona.* Spektar je praska kontinuiran i za sve vrste tog zvučnog fenomena uglavnom je jednaka oblika, tek s pomakom u horizontalnom ili vertikalnom smjeru (sl. 1.19).

U današnje vrijeme poseban je problem prasak što ga proizvode avioni koji lete brže od zvuka. To je *nadzvučni tutanj.* Avion u letu remeti stanje mirovanja zraka, pa nastaju valovi koji se šire brzinom zvuka u okolni prostor. Dok avion leti sporije od brzine zvuka, poremećaji se šire na sve strane i utišavaju se, nestaju (sl. 1.20.*a*). Pri njegovoj nadzvučnoj brzini slika je drukčija (sl. 1.20.*b*). Tad poremećaji zaostaju za avionom, pa se na njegovim prednjim plohama zrak izvanredno jako stlačuje i ugrijava. Zbog toga nastaje „pramčani val”, sličan onome koji stvara brod režući površinu vode (sl. 1.20.*c*). Dijagram toga udarnog vala ima oblik slova N, pa mu je odatle i naziv *N-val* (sl. 1.20.*d*). Iz dijagrama se vidi da je u prvoj polovici tlačni val pozitivan, dakle su mu vrijednosti veće od atmosferskoga, a u drugoj polovici je negativan, s vrijednostima koje su manje od atmosferskog tlaka. Vremenska duljina takva vala za velike je avione oko 0,3 — 0,5 s, a za male oko 0,1 s. Budući da se i pozitivni i negativni dio vala čuju kao detonacija, to se kod velikih aviona, zbog veće duljine N-vala, čuju dva nadzvučna tutnja u brzom slijedu. Kao što iz ovog tumačenja izlazi, avion u nadzvučnom letu proizvodi N-val *neprestano,* a ne — kako neupućeni misle — samo u času „probijanja zvučnog zida”.

Leteći na visini od 20 km od 2 do 2,2 puta brže od zvuka, avion tipa *Concorde* proizvodi na Zemljinoj površini tlak s vršnom vrijednošću od 134 dB. To odgovara tlaku od 10 daN/m^2. Kako su najjače komponente spektra u području oko 10 Hz, taj tlak može biti opasan za građevinske elemente velikih površina, kao prozore, lagane krovne konstrukcije i sl. Opasnost se od šteta povećava ako avion mijenja smjer. Tada nastaje fokusiranje zvučnog vala pa vršne vrijednosti tlaka porastu i do 50 daN/m^2.

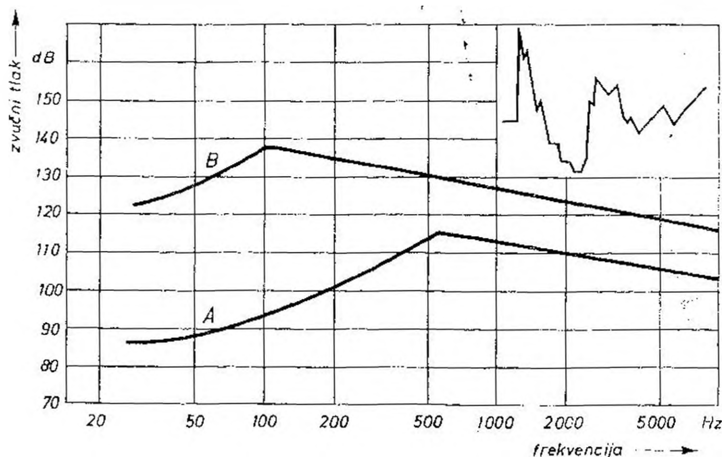


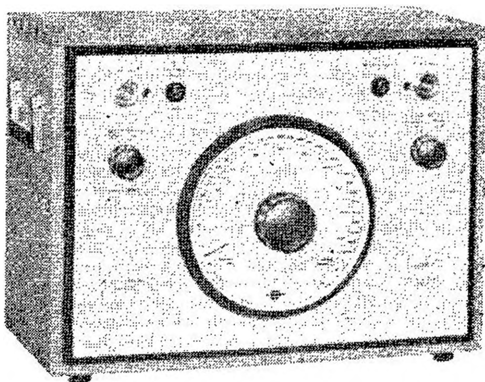
Sl. 1.20. Širenje zvučnih valova u okolni prostor pri brzinama gibanja izvora zvuka: a) manjima od brzine zvuka i b) većima od brzine zvuka. Slika u sredini: za vrijeme nadzvučnog leta aviona zvuk se širi unutar stošca. c) Pramčani val broda sličan je zvučnom N-valu što ga proizvodi avion leteći nadzvučnom brzinom. d) Kad stigne do zemljine površine, N-val se od nje reflektira.



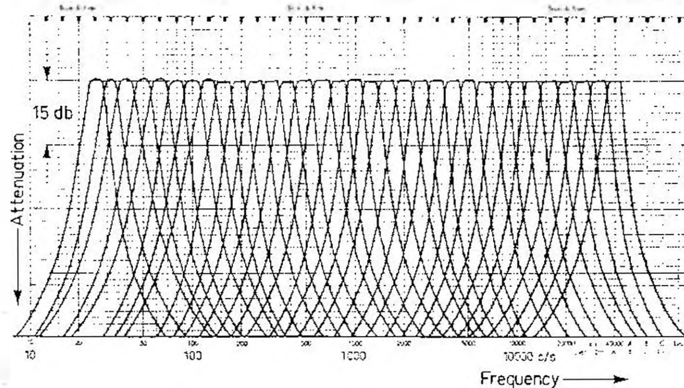
Sl. 1.18. Spektar šuma je kontinuiran. Neke jače komponente iskaču iz kontinuiranog spektra.

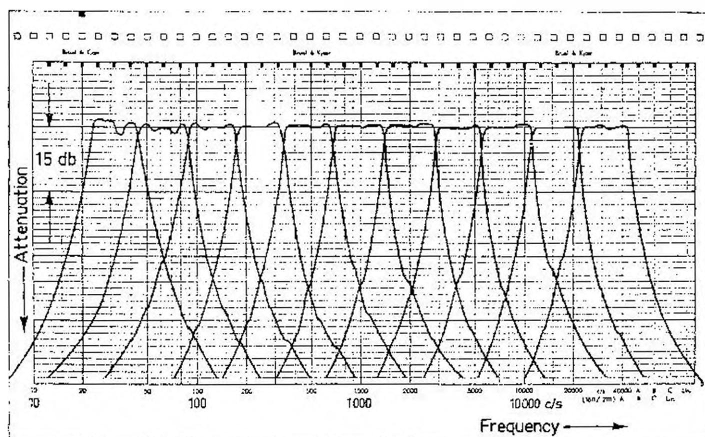
Sl. 1.19. Spektri praska: kontinuirani spektar A odnosi se na prasak pištolja na udaljenosti od 1 m, a kontinuirani spektar B na prasak topa od 75 mm na udaljenosti od 5 m.





Sl. 1.21. Tercni i oktavni filtar. Filtarski se sustav sastoji od 33 tercna filtra koji se spajanjem po tri susjedna tercna filtra pretvara u oktavni s jedanaest oktavnih područja (Brüel & Kjaer).

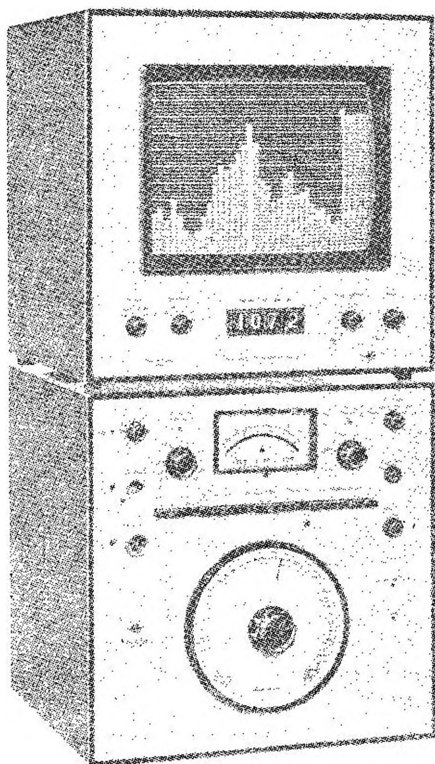




Analiza zvučnih procesa u kojima komponente linijskog spektra nisu suviše guste provodi se pomoću selektivnih aparata *(harmoničkih analizatora)*. Takvi aparati omogućuju da se otčitavaju frekvencije pojedinih komponenata i njihove amplitude.

Zvučni procesi s kontinuiranim spektrom analiziraju se *filtrima* koji imaju propusne pojasove u širini od *oktave* ili *terce* (sl. 1.21). Otčitane vrijednosti zvučnog tlaka unose se u dijagram na mjestu središnjih frekvencija oktavnih ili tercnih područja (vidi *Prilog* 8). Kratkotrajne zvučne pojave mogu se analizirati na taj način da se pojava snimi na magnetofonsku vrpcu i krajevi se vrpce međusobno zalijepe. Trajnim opetovanjem reprodukcije s takve „beskrajne" vrpce i postupnim ukapčanjem pojedinih filtarskih područja dobivaju se vrijednosti za crtanje dijagrama koji pokazuje oblik kontinuiranog spektra analizirane zvučne pojave.

Često u buci ili šumu postoji stalna nepravilna promjenljivost efektivne vrijednosti zvučnog tlaka u pojedinim tercnim pojasovima. Trenutni oblik spektra takvih zvučnih pojava pokazuje aparat koji ima naziv *trenutni analizator*. U analizator tog tipa signal se dovodi u trideset paralelno spojenih tercnih filtara. Elektroničko otipkavanje trenutnih vrijednosti na izlazu svih tercnih filtara akustičkog područja traje samo 20 ms, što znači da se u jednoj sekundi provede pedeset otipkavanja cijelog spektra. Stoga se na ekranu analizatora mogu pratiti trenutne promjene koje se pojavljuju u tercnim pojasovima (sl. 1.22).



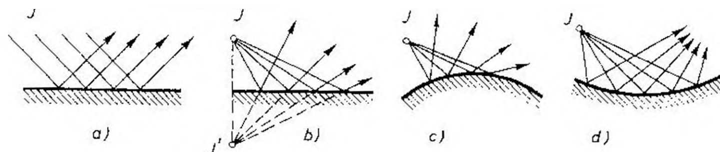
Sl. 1.22. Trenutni analizator tvrtke Brüel & Kjaer

1.2.1. Refleksija zvuka

Put širenja zvuka može se prikazati *zvučnim zrakama*. To su zamišljeni pravci, okomiti na čelo valova, koji izlaze iz izvora zvuka. One omogućuju da se optički zakoni vezani za refleksiju svjetlosti primijene i u akustici. Pri tome mora biti ispunjen uvjet da je *duljina zvučnog vala mnogo manja od dimenzija plohe od koje se val reflektira.*

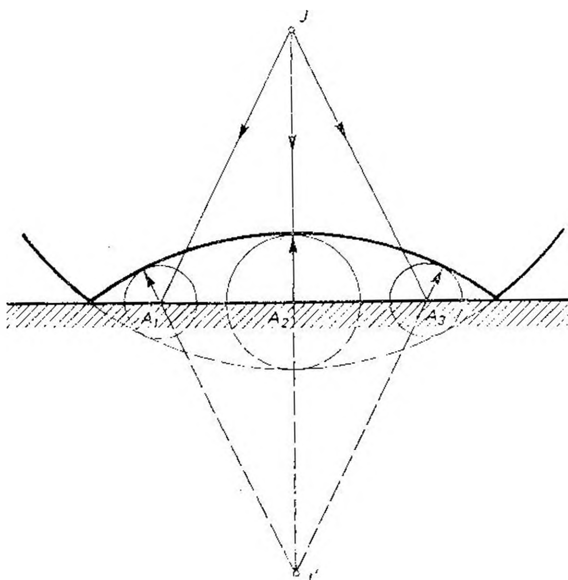
Sl. 1.23*a* sadrži prikaz refleksije *ravnoga* zvučnog vala. Prema zakonima refleksije kut upada jednak je kutu refleksije, a upadna i reflektirana zraka u istoj su ravnini.

Na sl. 1.23.*b* izvor je zvuka u blizini plohe od koje se zvuk odbija, pa se tad reflektirane zrake mogu konstruirati tako da se povuku od zrcalne slike izvora zvuka. Pri refleksiji od konveksne površine (sl. 1.23*c*) ne vrijedi zrcalna slika, ali se ipak može primijeniti zakon refleksije, pri čemu zamišljamo da je konveksna ploha sastavljena od malih ravnih dijelova. Isti postupak poslužit će nam i za refleksiju od konkavne plohe (sl. 1.23.*d*). Konveksna ploha uzrokuje divergenciju zvučnih zraka. Nakon refleksije od konkavne plohe zrake se, naprotiv, koncentriraju ili fokusiraju.



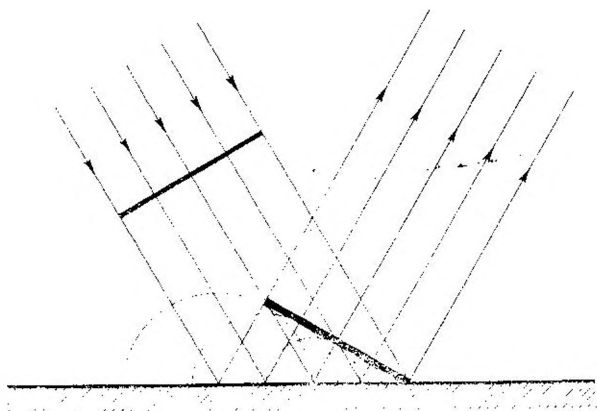
Sl. 1.23. Reflektiranje zvučnih zraka od različitih ploha. a) odbijanje zvučnih zraka ravnog vala od ravne plohe; reflektiranje zvučnih zraka koje dolaze iz točkasta izvora. b) od ravne plohe, c) od konveksne plohe i d) od konkavne plohe

Refleksija se može pratiti i crtanjem *čela valova*. Prema *Fresnel-Huygensovu* principu svaki poremećaj u nekoj elastičnoj sredini izaziva elementaran kuglast val. Na sl. 1.24. takav je reflektirani val nastao udarom kuglasta vala o ravnu plohu. Točke A_1, A_2, A_3 . . ., postale su izvori elementarnih kuglastih valova koji svi zajedno svojim čelom tvore reflektirani val. Taj val možemo također smatrati direktnim valom zrcalnog izvora zvuka I'.



Sl. 1.24. Reflektiranje kuglasta vala od ravne plohe. Čelo reflektiranog vala konstruirano je primjenom principa elementarnih kuglastih valova.

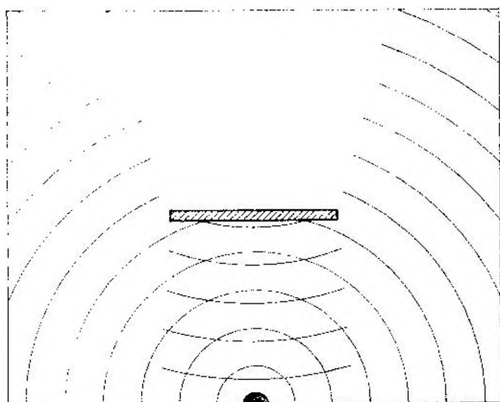
Na sl. 1.25. prikazano je kako se primjenom principa elementarnih kuglastih valova može dobiti oblik ravnoga reflektiranog vala.

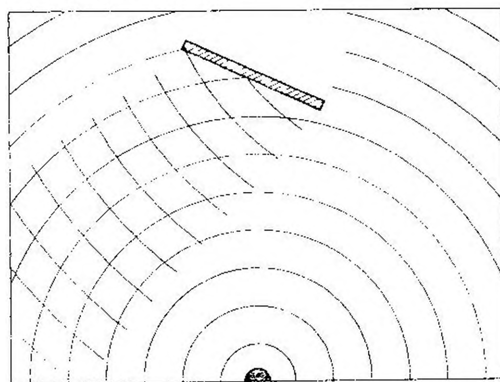


Sl. 1.25. Reflektiranje ravnog vala od ravne plohe. Čelo reflektiranog vala konstruirano je primjenom principa elementarnih kuglastih valova.

Sl. 1.26. donosi dva primjera zvučne refleksije od zapreka mnogo većih dimenzija nego što je duljina zvučnih valova. U prvome se zvučni valovi potpuno odbijaju od zapreke, pa ih iza nje praktički nema; taj je prostor u „zvučnoj sjeni”. U drugom je slučaju zapreka prema smjeru zvučnih valova postavljena pod stanovitim kutom, tako da djeluje kao reflektor. I tu se zvučni valovi u cijelosti reflektiraju u određenom smjeru, a iza reflektora nastaje „zvučna sjena”.

Zakoni refleksije zvuka koji su ovdje primijenjeni sasvim odgovaraju onima u geometrijskoj optici, pa odatle i naziv *geometrijska akustika.*

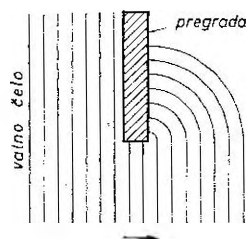


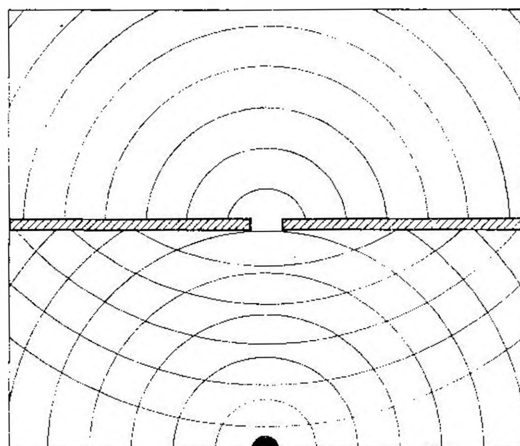


Sl. 1.26. Udaranjem zvučnih valova o zapreku kojoj su dimenzije veće od njihove duljine nastaje potpuna refleksija, a iza zapreke nema zvučnih valova — taj je prostor u „zvučnoj sjeni“.

1.2.2. Difrakcija zvučnog vala

Govoreći o refleksiji zvučnih valova posebno smo napomenuli da zakoni refleksije, poznati iz optike, vrijede u akustici samo onda ako su valovi mnogo kraći od dimenzija zapreke na kojoj se reflektiraju. Iz svakodnevnog iskustva znamo da možemo čuti i ono što se događa iza neke pregrade. Zvučni valovi zaobilaze zapreke, mijenjanjući pri tome smjer širenja (sl. 1.27). Kod njih, dakle, zapažamo *difrakciju* ili *skretanje*. Što je veći odnos valne duljine prema dimenzijama pregrade, difrakcija je veća.

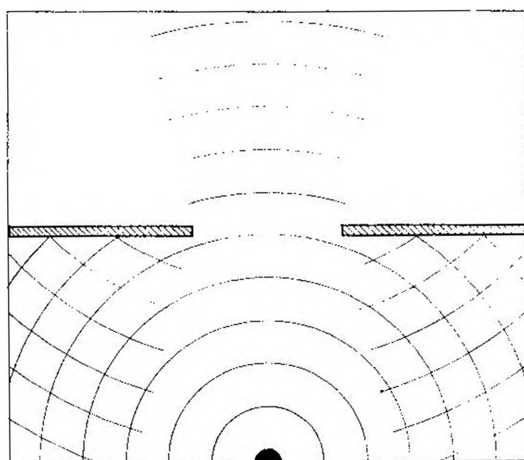




Sl. 1.27. Difrakcija ravnoga zvučnog vala oko ruba pregrade

Sl. 1.28. Difrakcija zvučnog vala pri prolasku kroz otvor kojemu su dimenzije manje od valne duljine

Difrakcija zvučnih valova prilikom prolaska kroz mali otvor vidi se u shematskom prikazu na sl. 1.28. Tu je zamišljeno da je valna duljina mnogo veća od veličine otvora. Kao što pokazuje slika, otvor tad postaje izvor kuglastoga vala koji se širi na sve strane iza pregrade. Budući da kroz uzak otvor može proći mala količina zvučne energije, intenzitet je zvuka iza pregrade malen. To znači da se praktički od pregrade reflektira cijela upadna zvučna energija.

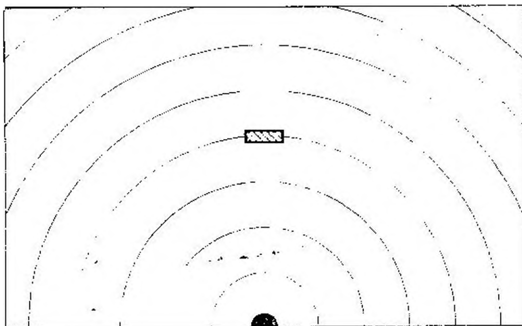


Na sl. 1.29. otvor je u pregradi mnogo veći od valne duljine. Tu on ne slabi intenzitet zvuka, a oblik zvučnog „mlaza" geometrijski je određen otvorom. Dio se zvuka koji udari o pregradu odbija.

Sl. 1.29. Pri prolasku zvučnih valova kroz otvor dimenzija mnogo većih od njihove duljine oni ne slabe, a „zvučnom mlazu" je presjek jednaka oblika kao i u otvora.

Zapreka koja je malena prema valnoj duljini praktički ne utječe na širenje zvučnog vala (sl. 1.30). Zvučne sjene iza zapreke gotovo nema, a neznatna je i reflektirana zvučna energija.

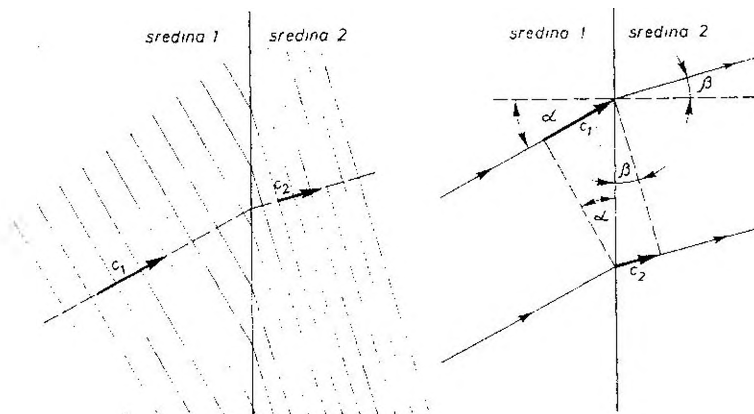
Sl. 1.30. Zapreka koja je malih dimenzija u usporedbi s valnom duljinom praktički ne utječe na širenje zvučnih valova.



1.2.3. Refrakcija zvučnog vala

Slično svjetlosnim zrakama i zvučne se zrake lome pri prijelazu iz jedne sredine u drugu. Veličina promjene smjera ili refrakcije ovisi o odnosu brzina širenja zvuka (sl. 1.31):

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2} \tag{1.30}$$

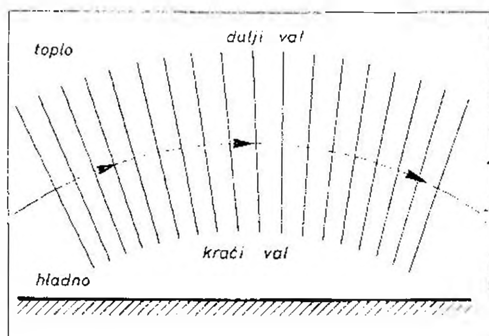


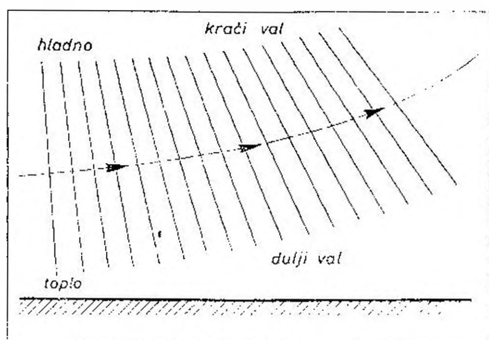
Sl. 1.31. Prolaskom zvučnih zraka iz sredine s jednom brzinom širenja u sredinu s drugom brzinom širenja nastaje lom zraka jer su valne duljine različite.

Izmedu brzine zvuka u zraku i one u krutim tvarima velika je razlika. Stoga prema izrazu (1.30) izlazi da pri prijelazu zvuka iz zraka u krutu tvar i obrnuto, zvučne zrake izlaze, ili ulaze, gotovo okomito na razdjelnu plohu.

Iznad tla su slojevi zraka različite temperature. U onima koji su topliji brzina zvuka je veća pa je, prema tome, veća i njegova valna duljina. Iz toga zaklju-

čujemo da su u toplijem zraku čela valova međusobno više razmaknuta. Zbog toga se smjer u kojemu se zvuk širi savija kao na sl. 1.32.



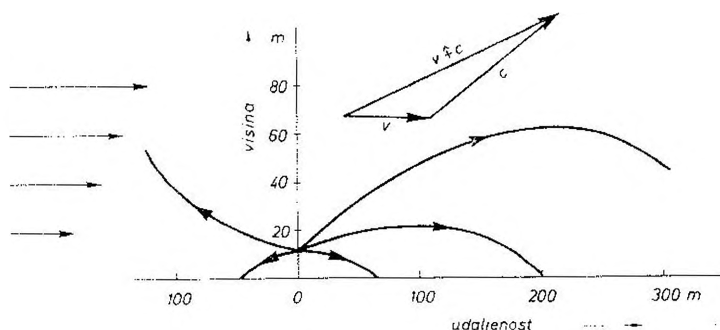


Ako je pri zemlji zrak topliji nego u višim slojevima, zvuk će se kretati prema gore. Obratno je uz toplije gornje slojeve. Time se razjašnjava zašto se u proljeće kad se prvi topli zrak nađe iznad zaleđene plohe — ili općenito pri dolasku toplih zračnih struja — zvuk čuje iz velike daljine. Suprotno je ljeti kad je vrući zrak pri samom tlu, zbog čega je domet zvuka malen.

Nejednolikost gustoće atmosfere uzrok je da se grmljavina dugo razliježe i tutnji. Ta je pojava osobito izražena za nevremena.

Sl. 1.32. Gornja slika: prijelazom zvučnih valova iz hladnoga atmosferskog sloja u topli zvučne se zrake savijaju nadolje. Donja slika: ulazeći iz toplog sloja u hladni, zvučne se zrake savijaju prema gore.

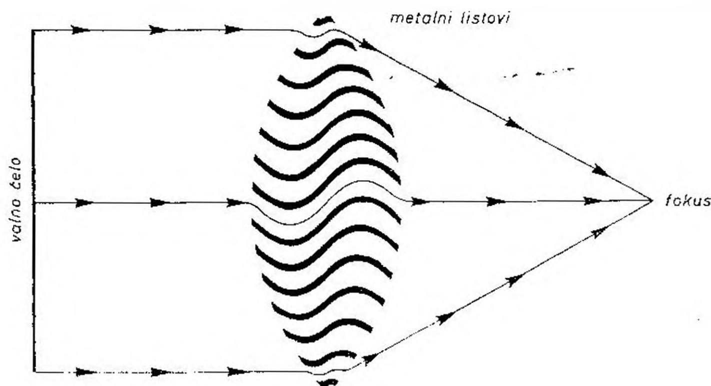
Vjetar također mijenja pravac širenja zvuka. Brzina vjetra i brzina zvuka vektorski se zbrajaju (sl. 1.33). Budući da je zbog trenja o tlo brzina vjetra u donjim slojevima manja, to je i brzina zvuka manja u tim slojevima. Zbog toga se zvučne zrake valova koji putuju protiv vjetra svijaju prema gore, a onih koji se šire niz vjetar zakreću se prema tlu.

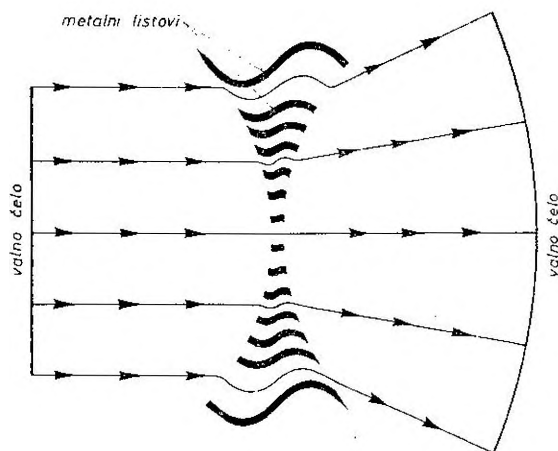


Sl. 1.33. Savijanje zvučnih zraka pod utjecajem vjetra

Pomoću mehaničkih zapreka odgovarajućeg oblika može se postići da zvuk prelazeći kroz zapreku stigne istodobno s onim koji dolazi mimo nje. Na tom se principu zasnivaju *akustičke leće*. Na sl. 1.34. vidi se da je srednja zvučna zraka jednako duga kao i gornja i donja zraka, što uzrokuje koncentraciju zvuka u fokusu.

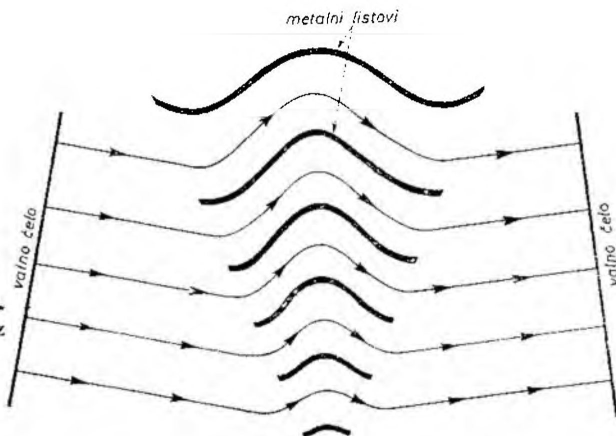
Na sl. 1.35. akustička je leća koja raspršuje zvuk. Na istom principu djeluje akustička prizma koja, kao što se vidi na sl. 1.36, mijenja smjer čelu vala.





Sl. 1.34. Fokusiranje zvučnih zraka prolaskom kroz bikonveksnu akustičku leću

Sl. 1.35. Raspršivanje zvučnih zraka pri prolasku kroz bikonkavnu akustičku leću



Sl. 1.36. Promjena smjera zvučnih zraka zbog prolaska kroz akustičku prizmu

1.2.4. Apsorpcija zvuka

Apsorpcija zvuka je proces oslabljivanja zvuka prilikom njegova prolaska kroz neku sredinu ili pri prijelazu preko neke površine. Zvučna se energija pri tome najvećim dijelom pretvara u toplinu. O procesu apsorpcije u apsorpcionim materijalima i konstrukcijama bit će opširno riječi u glavi petoj, pa se na tome ovdje nećemo zadržavati. Ovom prilikom reći ćemo nešto o apsorpciji zvuka u zraku, magli i dimu, te pri prijelazu preko raslinja.

Apsorpcija zvuka u zraku nastaje zbog fizikalne reakcije između H_2O-molekula i O_2-molekula. Iz toga ćemo zaključiti da ta pojava ovisi o vlažnosti zraka. Tablica pokazuje kako na apsorpciju u zraku utječe relativna vlažnost i frekvencija pri temperaturi od 20 °C (prema *Knudsenu)*:

Tablica 1.3.

Relativna vlažnost u %	Prigušivanje u dB/m 3 000 Hz	6 000 Hz	10 000 Hz
10	0,08	0,15	0,20
20	0,045	0,15	0,27
40	0,02	0,08	0,17
50	0,02	0,07	0,15

Općenito se može reći da se apsorpcija s *povećanjem vlažnosti zraka smanjuje*, a da se s *porastom frekvencije povećava.*

Zbog velike apsorpcije zvuka na višim frekvencijama daleka se grmljavina čuje samo kao potmulo mumljane.

U ultrazvučnom području zvuk ima u zraku sasvim malen domet. Intenzitet zvuka kojemu je valna duljina oko 0,8 mm padne na stoti dio početne vrijednosti već nakon 40 cm puta, a uz valnu duljinu od 0,1 mm već nakon samo 0,6 cm. Veliko prigušivanje je razlog da na frekvencijama višima od nekoliko megaherca zvučni valovi u zraku potpuno iščezavaju.

Apsorpcija zvuka u magli i dimu ovisi o veličini čestica koje lebde. Ako su one vrlo malene, gibaju se jednakom brzinom kao i čestice zraka, pa ne nastaje apsorpcija. U magli koja omogućuje vidljivost do 50 m dodatno prigušivanje po metru ovako ovisi o frekvenciji (prema *Knudsenu)*:

Tablica 1.4.

Frekvencija u Hz	Dodatno prigušivanje u dB/m
500	0,014
1 000	0,02
4 000	0,03
8 000	0,04

U dimu se također apsorpcija povećava s porastom frekvencije. Prigušivanje koje uzrokuje raslinje, kao trava, žito, grmlje, šuma, ovisi o visini izvora zvuka i slušaoca iznad zemlje. Tablica koju donosimo vrijedi za normalan slučaj, kad su izvor zvuka i uho oko 1—2 m iznad tla (prema *C. F. Eyringu).*

Tablica 1.5.

Raslinje	Dodatno prigušivanje u dB/m		
	100 Hz	1 000 Hz	5000 Hz
Trava rijetka, visine od 10 do 20 cm	0,005	0,03	—
Trava gusta, visoka od 40 do 50 cm	0,005	0,12	0,15
Žito gusto, visine od 180 cm	0,03	0,36	0,4
Šuma	0,02	0,06	0,15

Apsorpcija se na višim frekvencijama povećava zato što su dimenzije zapreka u veličini valnih duljina.

1.2.5. Prijelaz zvučne energije kroz krute tvari

Kad zvučni valovi udare o plohu nekog predmeta, jedan se dio energije, kao što smo već iznijeli, reflektira i apsorbira, a ostatak se prenese kroz tijelo na drugu stranu. Količina energije koja se od neke granične plohe reflektira, odnosno koju tijelo propusti, ovisi o odnosu između akustičkih otpora tvari s jedne i druge strane granične plohe. Zvučna energija to manje prelazi iz jedne tvari u drugu što se one više razlikuju u tvrdoći i gustoći, što je veća razlika u akustičkim otporima.

Za prijelaz zvuka iz jedne tvari u drugu vrijedi odnos:

$$\frac{E_1}{E_2} = k = \frac{4\,Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \qquad (1.31)$$

Tu je E_1 gustoća zvučne energije u jednoj tvari, E_2 u drugoj tvari, a Z_1 i Z_2 akustički su otpori. U tablici 1.6. vrijednosti su akustičkih otpora za neke tvari.

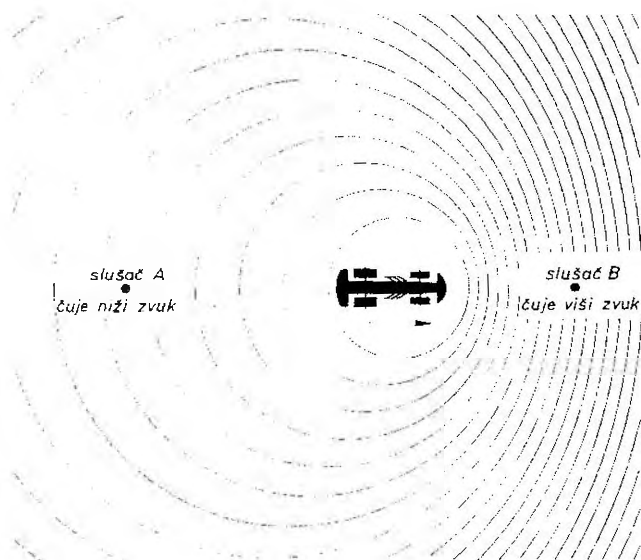
Tablica 1.6.

Materijal	$Z \frac{(\mathrm{Ns})}{\mathrm{m}^3}$	k	R (dB)
Čelik	39.10^6	0,000 04	88
Opeka	$6{,}47.10^6$	0,000 26	76
Hrastovina	$2{,}77.10^6$	0,000 60	64
Pluto	$0{,}12.10^6$	0,013 57	37
Guma	$0{,}05.10^6$	0,132 43	80
Zrak	410	1	—

Iznosi za faktor k vrijede za prijelaz zvuka iz zraka u neku tvar, ili obrnuto. Kad zvuk izlazi iz tvari u zrak, ponovno slabi intenzitet. Zbog dva prijelaza dolazi faktor k s kvadratom, dakle je broj decibela, kojim se izražava slabljenje jakosti zvuka pri jednom prijelazu, za dva prijelaza dva puta veći. U tablici broj decibela označuje zvučno prigušivanje R za oba prijelaza zvuka. Treba posebno napomenuti da ovi podaci vrijede za prolazak zvuka samo longitudinalnim valovima.

1.2.6. Dopplerov efekt

Iz svakodnevnog je iskustva poznata pojava da se mijenja visina tona što ga proizvodi automobil svojom sirenom ako on pri tome brzo promiče mimo nas. Kad se auto približava, ton sirene je viši, a pri njegovom udaljivanju niži je nego kad automobil stoji. Ta se pojava naziva *Dopplerovim efektom.** Uzrok joj je taj što kad nam se izvor zvuka približava, ili mi idemo prema njemu, udara u uho više zvučnih valova u jedinici vremena nego kad izvor zvuka stoji (sl. 1.37.). Obrnuto je kad se izvor udaljuje od uha ili uho od izvora zvuka. Tad nam stiže manje zvučnih valova u jedinici vremena nego kad se udaljenost između izvora zvuka i uha ne mijenja.



Sl. 1.37. Za slušatelja kojemu se izvor zvuka približava ton je viši, a za onoga od kojeg se udaljuje niži je od tona što ga izvor stvarno emitira.

Frekvencija f_p koja se dobiva kao rezultat Dopplerova efekta može se izračunati po formuli:

$$f_p = \frac{c \pm c_p}{c \mp c_i} \cdot f_i \qquad (1.32)$$

* *Christian Doppler* (1803—1853), profesor matematike u Pragu i Beču

Pri tome je c brzina širenja zvuka u zraku, c_p brzina kretanja promatrača, a c_i je brzina i f_i frekvencija izvora zvuka.

Ako izvor zvuka stoji ($c_i = 0$), a promatrač se približava briznom c_p, u brojniku treba da bude znak plus. Kad se promatrač udaljuje, znak je minus. Ako promatrač stoji ($c_p = 0$), a izvor zvuka mu se približava, u nazivniku mora biti znak minus. Ako se izvor brzinom c_i udaljuje od promatrača, znak će biti plus.

Formula (1.32) vrijedi ako zrak miruje. Treba li uračunati učinak vjetra, c se zamjenjuje sa $c + c_v$, gdje je c_v brzina vjetra u smjeru kojim se širi zvuk. Time formula dobiva oblik:

$$f_p = \frac{c + c_v \pm c_p}{c + c_v \pm c_i} \cdot f_i \tag{1.33}$$

Iz jednadžbe može se zaključiti da sâm vjetar ne mijenja visinu tona ako nema relativnog gibanja između izvora zvuka i promatrača.

Efekt, koji je po njemu dobio naziv, C. Doppler je opisao 1842. godine u jednom članku. Tri godine nakon toga provjerena je njegova teorija. Znanstvenici su se postavili pokraj pruge kojom je jurio vlak s petnaest trubača. Kad je vlak prošao uz promatrače, tonska visina truba je opala, kao što je Doppler pretpostavio.

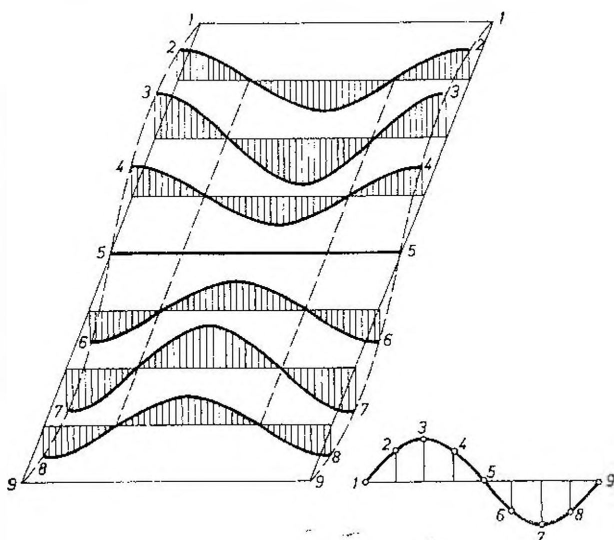
1.2.7. Stojni valovi

Kad se dva jednaka zvučna vala kreću u smjeru jedan prema drugome, nastaju *stojni valovi.* Osnovna osobina takvih valova je u tome što je efektivna vrijednost tlaka na nekim mjestima sredine u kojoj se zvuk širi trajno jednaka nuli. Ta mjesta, koja mogu biti točke, crte ili površine, nazivaju se *čvorovima.* Za četvrtinu valne duljine udaljenija mjesta, odnosno točke, linije ili površine na kojima je zvučni val maksimalne vrijednosti, nazivaju se *trbusima.* Sl. 1.38. prikazuje prostorno-vremenske dijagrame zvučnog tlaka za vrijeme jedne titrajne periode.

O stojnim valovima opširnije ćemo govoriti u četvrtoj glavi kad se budu razmatrale vlastite frekvencije prostorije.

1.2.8. Treptajni valovi

Za stojne je valove bitno da su to dva vala potpuno jednake valne duljine koji putuju u suprotnim smjerovima. Ta pojava nastaje prilikom udara vala o neku stijenu na kojoj dolazi do refleksije. Ako se u nekom prostoru nađu dva vala kojima su valne duljine nešto različite, pojava će biti drukčija. To se lijepo vidi na sl. 1.39.

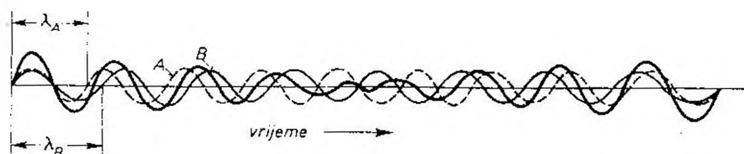


Sl. 1.38. Stanja zvučnog tlaka u stojnom valu za vrijeme jedne periode

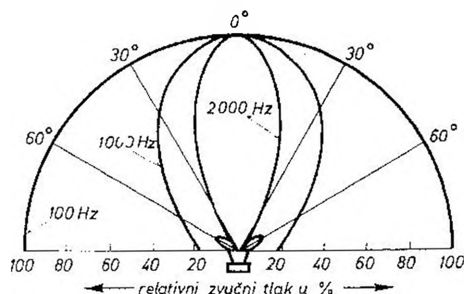
Kad se poluvalovi obaju valova više ili manje preklapaju, kao lijevo u početku i desno na kraju slike, dobiva se sumaran val povećane amplitude. Prema sredini slike dolaze valovi sve više „u protufazu”, što rezultira padom amplitude sumarnog vala. Tako nastaju *treptaji*, periodično mijenjanje jakosti zvuka na nekom mjestu slušanja. Broj treptaja u sekundi jednak je razlici frekvencija primarnih tonova. Ako su frekvencije primarnih tonova 500 i 505 Hz, čut će se *vibrato* s frekvencijom od 5 Hz.

1.2.9. Usmjerenost zvučnog izvora

Pri razmatranju pojava koje nastaju u prostoru kad neki izvor emitira zvuk, treba paziti na *usmjernu karakteristiku izvora*. Općenito se može reći da je intenzitet valova kojima je valna duljina mnogo veća od dimenzija izvora (od promjera zvučnika), približno jednak u svim smjerovima. Na višim frekvencijama valna je duljina u blizini dimenzija izvora ili manja od njih, i u tom frekvencijskom području dolazi do usmjerivanja zvučnih valova Ta se pojava vidi iz *usmjernih karakteristika zvučnog izvora*, kakve npr. za zvučnik prikazuje sl. 1.40.



Sl. 1.39. Interferencijom dvaju valova kojima su valne duljine blize nastaju treptajni valovi



Sl. 1.40. Zvučni izvori imaju na različitim frekvencijama različite usmjerne karakteristike.

Za frekvenciju od 100 Hz usmjerenog djelovanja nema. pod bilo kojim kutom prema osi zvučnika, dakle bilo u kojem smjeru, ta je frekvencija na jednakoj udaljenosti od zvučnika iste glasnoće. Na frekvenciji od 1 000 Hz, pogotovu na onoj od 2 000 Hz, kao što se zapaža iz dijagrama, zvuk se „usnopljuje”, prostorni kut emitiranja postaje malen i sve je manji što je frekvencija viša.

Glava druga

SLUŠNA AKUSTIKA

Problemi prostorne akustike zapravo se svode na težnju da se ostvari dobro i ugodno slušanje u nekoj prostoriji. Zato se akustički problemi ne mogu proučavati i rješavati a da se pobliže ne poznaju svojstva uha. Slušna akustika proučava na koji način to čovjekovo osjetilo prima i interpretira promjene akustičkog tlaka koje sadržavaju zvučni valovi.

2.1. UHO — IZVANREDNO OSJETLJIV I UNIVERZALAN INSTRUMENT

Uho je prijemnik zvuka koji radi na istom principu kao i mikrofon: *akustičku energiju pretvara u električku.* Priroda je, međutim, stvorila mnogo savršeniji instrument. To se odnosi i na membranu, odnosno bubnjić, i na uređaj kojim se prilagođuje impedancija, te na mikrofonski kabel, odnosno živčani sistem. Slušni čovjekov organ više je nego mikrofon. Osim što ima ulogu prijemnika on je i vrlo selektivan frekvencijski analizator, određivač smjera zvučnog izvora, indikator glasnoće, visine i boje tona. Opseg frekvencija koje uho čuje obuhvaća više od deset oktava. Radi usporedbe spomenimo da je oko osjetljivo na frekvencije samo jedne oktave. Odnos između zvučnog tlaka koji uho može podnijeti, a da se ne ošteti, i zvučnog tlaka koji tek što može zamijetiti, iznosi više od $1 : 10^6$. Na području najveće svoje osjetljivosti uho reagira već na zvučni tlak koji je 10^{-10} puta niži od atmosferskoga. Uz taj zvučni tlak bubnjić titra amplitudom manjom od 10^{-9} cm, što je jedna stotisućinka valne duljine svjetlosti ili jedna desetina promjera najmanjeg atoma.

2.2. GRAĐA UHA I SLUŠNI PROCES

2.2.1. Građa uha

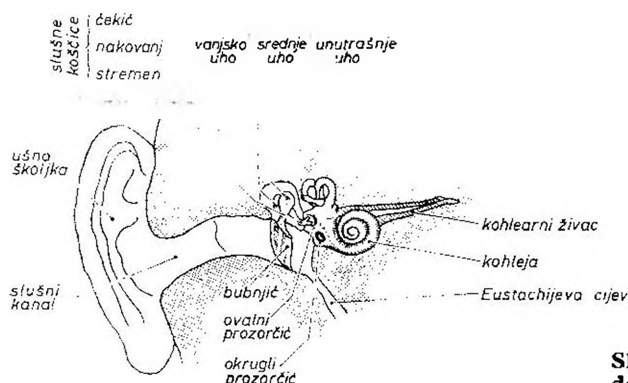
Slušni se čovjekov organ dijeli na tri glavna dijela: *vanjsko, srednje i unutrašnje uho* (sl. 2.1).

Vanjsko se uho sastoji od *ušne školjke* ili *uške, slušnog kanala* (ili *zvukovoda)* i *bubnjića.* Ušna školjka i slušni kanal čine lijevak koji na srednjim i visokim frekvencijama pojačava zvuk. Efekt pojačavanja može se lako provjeriti ako se savijen dlan prisloni uz ušnu školjku. Time se ona proširi, pa glasnoća slušanog zvuka postane veća. Ušna školjka djeluje zasjenjujuće za visoke tonove koji dolaze iz smjera iza glave. To uhu omogućuje usmjereno slušanje tih frekvencija ako dolaze

s prednje strane. Također nabori i udubine ušne školjke imaju svoj utjecaj pri slušanju. Ušna školjka zajedno sa slušnim kanalom složeni su rezonantni sistem koji na višim frekvencijskim područjima pojačava zvučni tlak na bubnjiću, ovisno o smjeru upada zvučnog vala i o udaljenosti od izvora zvuka.

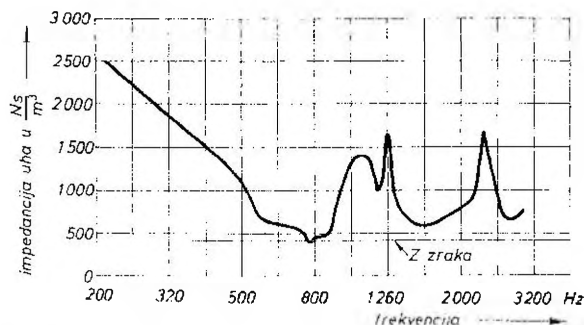
Duljina slušnog kanala je od 2 do 2,5 cm, a presjek mu iznosi od 0,3 do 0,5 cm². Rezonantna frekvencija negdje mu je oko 3 500 Hz, pa se u tom području dobiva pojačanje zvučnog tlaka za oko 10 dB. Da bi se spriječio kukcima prilaz do bubnjića, u slušnom su kanalu dlačice okrenute prema van. Istoj svrsi služi i voštana tvar koju izlučuju posebne žlijezde.

Opasnost od ulaska nekoga malenog kukca u slušni kanal nije malena. Hodanje kukca po bubnjiću čuje se kao gruvanje topova, što može trajno oštetiti sluh.



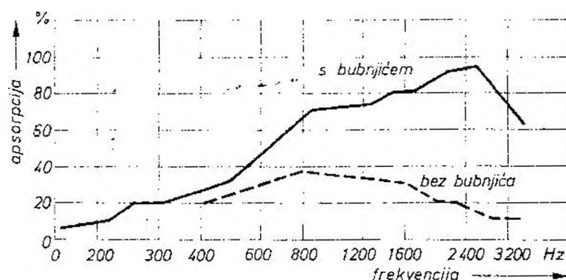
Sl. 2.1. Shematizirani presjek desnoga čovječjeg uha

Bubnjić je eliptična membrana u obliku plitka lijevka, s ispupčenjem prema srednjem uhu. Veća os bubnjića duga je oko 1 cm, manja je oko 0,85 cm, a debljina mu je oko 0,1 mm. Nabor na donjem kraju daje bubnjiću veću pokretljivost i omogućuje da titra oko osi koja je u blizini gornjeg ruba. Rezonantna je frekvencija bubnjića između 1 200 i 1 400 Hz. Na sl. 2.2. dijagram je impedancije bubnjića ovisno o frekvenciji. Najniža impedancija u području je oko 800 Hz. Na tim frek-



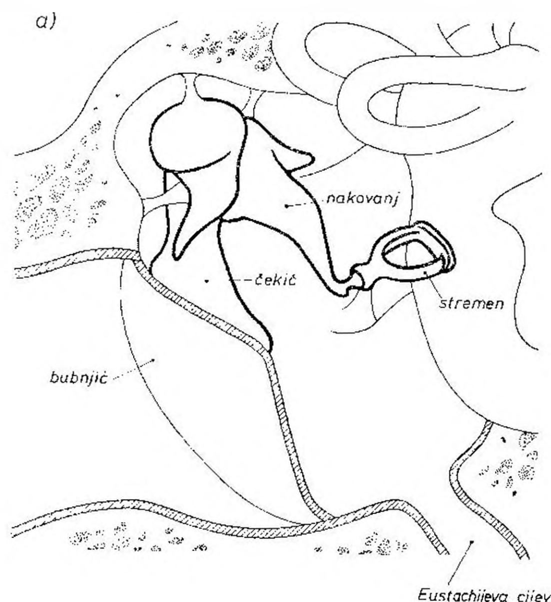
Sl. 2.2. Frekvencijska karakteristika impedancije bubnjića

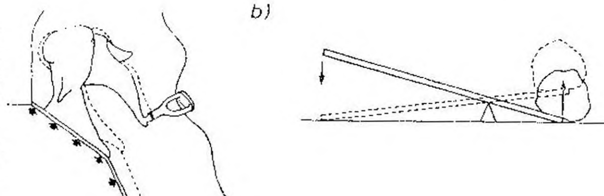
vencijama ona ima vrijednost specifičnoga akustičkog otpora zraka. Bubnjić je u tom frekvencijskom području gotovo idealan prijemnik zvuka jer se zvučni valovi praktički ne reflektiraju. Vrlo je zanimljiva i sposobnost apsorpcije. Kao što se vidi na sl. 2.3, u području od oko 2 000 do 3 000 Hz, dakle ondje gdje je uho najosjetljivije, apsorpcija je gotovo stopostotna. Crtkana se krivulja odnosi na osobu koja nema bubnjića.



Sl. 2.3. Frekvencijska karakteristika zvučne apsorpcije bubnjića

U prostoru su srednjeg uha *slušne koščice* (sl. 2.4.*a*). Taj je prostor s usnom šupljinom spojen *Eustachijevom cijevi*. Duljina te cijevi je oko 3 cm, a presjek joj je od 0,5 do 0,1 cm². U normalnom položaju stijenke Eustachijeve cijevi naliježu jedna na drugu, pa je ona zatvorena. Samo dok se zijeva ili guta, ona se otvara.





Sl. 2.4. a) Položaj slušnih koščica srednjeg uha. b) Lijevo: uz velik pomak bubnjića pomak pločice ovalnog prozorčića je malen. Desno: slušne su koščice polužni sustav koji ima zadatak da malu silu transformira u veliku.

Veza srednjeg uha s vanjskim prostorom preko Eustachijeve cijevi vrlo je bitna jer se tim putem izjednačuje unutrašnji i vanjski statički tlak, kako se ne bi oštetio bubnjić. Brza promjena tlaka, koja npr. nastaje prilikom ulaska vlaka u tunel ili naglog spuštanja aviona, izaziva bol u uhu. Ta neugodna pojava može se ublažiti ako se ždrijelom nekoliko puta izvrši pokret kao da se nešto guta. Pri tome se Eustachijeva cijev otvara, što omogućuje da se vanjski i unutrašnji tlak izjednače.

Slušne su koščice* srednjeg uha polužno-stapni sistem kojemu je zadatak da velik akustički otpor limfne tekućine u unutrašnjem uhu prilagodi malenome akustičkom otporu zraka i time omogući potpuniji prijenos zvučne energije. Prva slušna koščica, nazvana *čekić*, spojena je sa sredinom bubnjića, te se zajedno s njime pokreće oko osi na obodu bubnjića. Gibanje čekića prenosi se na tzv. *nakovanj*, s kojim je povezana treća slušna koščica, u obliku *stremena*, prema čemu je i dobila naziv. Sve tri slušne koščice zajedno čine polužni sistem kojemu je prijenosni odnos 3 : 2, što je premalo da bi se samo njime moglo postići prilagođenje impedancija (sl. 2.4.*b*). Velik zvučni tlak u tekućini unutrašnjeg uha postiže se na taj način što je površina ovalna prozorčića, na koji je pričvršćen stremen, dvadeset puta manja od površine bubnjića. Pokusima je ustanovljeno da se tlak na bubnjiću prema onome u unutrašnjem uhu pri frekvenciji od 100 Hz odnosi kao 1 : 10, a na frekvencijama od 500 do 2 400 Hz kao 1 : 15.

Odnos mehaničke transformacije srednjeg uha ne ovisi samo o frekvenciji nego i o intenzitetu zvučnog tlaka. Uho, naime, ima vrlo efikasnu automatsku regulaciju glasnoće. To je postignuto pomoću dvaju mišića smještenih u koštanu tkivu koje tvori stijenke srednjeg uha. Svojim tetivama mišići izlaze iz kosti, pri čemu jedan ima hvatište na stremenu, a drugi na čekiću (sl. 2.5). Na glasnoćama većima od 60 dB refleksno se steže prvi mišić i povlači vrh stremena. Time se promijeni mjesto osi vrtnje, pa pločica stremena, smještena u ovalnom prozorčiću, ne tlači tekućinu unutrašnjeg uha cijelom svojom površinom kao što je to na niskim glasnoćama (na kojima se pomiče kao vrata) jer jednim svojim dijelom tlači, a drugim se ugiba (sl. 2.6). Na glasnoćama višima od 90 do 100 dB stupa u akciju drugi mišić, koji vuče čekić prema unutra, napinjući tako bubnjić, što sprečava da on titra velikim amplitudama, pa to dodatno zaštićuje unutrašnje uho od preopterećenja. Taj sistem koji automatski ograničuje gibanje posebno je efikasan na frekvencijama nižima od 20 Hz. Osim te mehaničke zaštite uho ima i kemijsku zaštitu, u svome živčanom sistemu, koja se očituje kao pojava zamora.

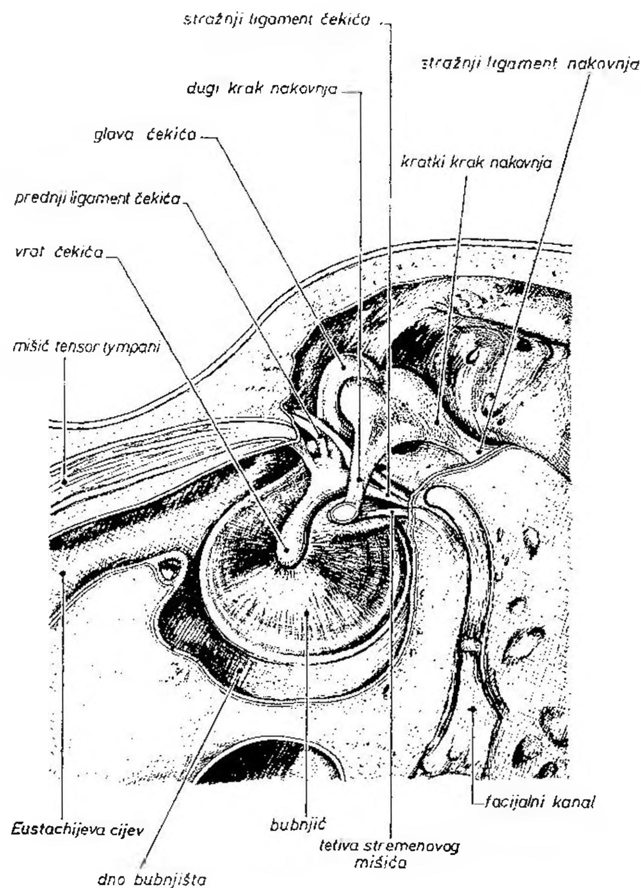
Zapaža se da su slušne koščice relativno velike mase. Priroda je na taj način zaštitila uho od prevelikog pobuđivanja vlastitim govorom.

Mišići *tensor tympani* i *tensor stapedius* svojim reflektornim stezanjem uzrokuju smanjenje prijenosa zvuka preko srednjeg uha do 30 dB na nižim frekvencijama, manje na višima. Oni se aktiviraju bilateralno i onda ako se zvuk velikog intenziteta privede samo jednom uhu. *Tensor tympani* se steže i u slučaju kad se puše u oči ili dodiruje ušna školjka.

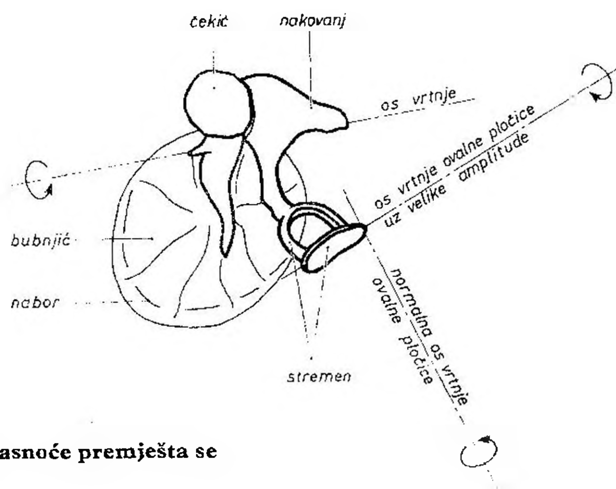
Unutrašnje uho ili *labirint* sastoji se od tri glavna dijela: *polukružnih kanala*, *predvorja* i *pužnice* (sl. 2.1). Polukružni kanali ne sudjeluju u slušnom procesu,

---

* Slušne koščice su međusobno spojene zgobnim ligamentima. Cijeli taj sistem ovješen je u šupljini srednjeg uha pomoću osam ligamenata. Dva su od njih tetive mišića, od kojih jedan pri kontrakciji napinje bubnjić, a drugi mijenja os vrtnje stremena. Ostali ligamenti su gornji, prednji i bočni ligament čekića, stražnji ligament nakovnja, ligament između čekića i bubnjića, te prstenasti ligament koji povezuje pločicu stremena sa stijenkama ovalnoga prozorčića.

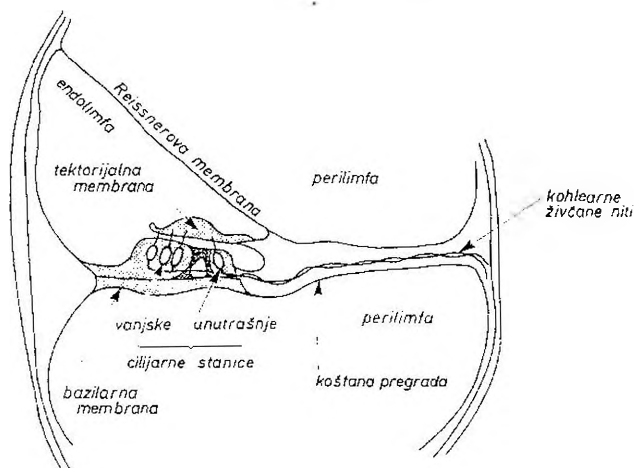


Sl. 2.5. Presjek srednjeg uha s pogledom na stražnju stranu bubnjića

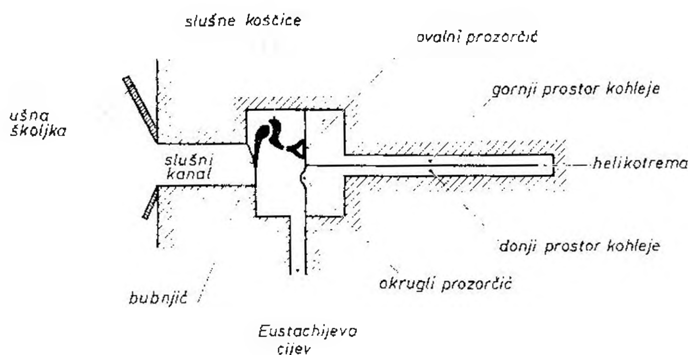


Sl. 2.6. Prelaskom na velike glasnoće premješta se os zakretanja ovalne pločice

već služe za *osjet ravnoteže*. Predvorje je dio unutrašnjeg uha ispred polukružnih kanala i pužnice. Pužnica je najsloženija konstrukcija u cijelome ljudskom tijelu. Kao što joj samo ime kaže, ona je po obliku cijev savijena u spiralu kao puževa kućica, s dva i pol do dva i tri četvrtine zavoja koštano-hrskavičnih stijenki koje su 1—2 mm debele. Duljina joj je nešto veća od 3 cm, a promjer osnovice oko 3,3 mm. Shematizirani je presjek pužnice na sl. 2.7. Uzduž nje protežu se tri kanala međusobno odijeljena *bazilarnom* i *Reissnerovom membranom*. U dnu joj je otvor zvan *helikotrema* (sl. 2.8), koji spaja gornji kanal s donjim. Reissnerova membrana vrlo je tanka i gipka, tako da gornja dva kanala možemo u hidrodinamičkom pogledu smatrati jednim. Cijelo unutrašnje uho ispunjeno je limfnom tekućinom.



Sl. 2.7. Shematizirani presjek pužnice



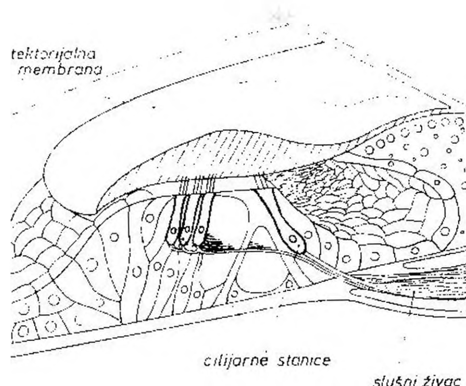
Sl. 2.8. Shematizirani uzdužni presjek uha

Između bazilarne i Reissnerove membrane je *endolimfa*, a u ostala je dva kanala *perilimfa*. Te tekućine nisu jednakog sastava. Na dijelu stijenke koji graniči sa srednjim uhom pužnica ima dva otvora. Gornji otvor u kojem je pločica stremena

vezana membranom sa stijenkama otvora nazvan je — kao što je već spomenuto — *ovalni prozorčić*, a donji je otvor — zatvoren membranom — *okrugli prozorčić*.

Iznad bazilarne membrane vrlo je osjetljiv slušni mehanizam *Cortijev organ* (sl. 2.9). On sadrži oko 23 500 sitnih osjetnih stanica iz kojih izlaze vrlo fine dlačice.

Znanstveno se anatomija uha počinje proučavati od Belgijanca *Andreasa Vesaliusa*, koji je 1543. godine završio veliku raspravu *O građi čovječjeg tijela*. U jednom poglavlju opisuje se otkriće slušnih koščica u srednjem uhu, čekića i nakovnja. Treću koščicu, koja nije veća od polovice rižina zrna, Vesalius nije uočio. Otkrio ju je nekoliko godina nakon toga *Gian Filippo Ingrassia*, i dao joj naziv stremen. Spojnu cijev između srednjeg uha i usne šupljine pronašao je 1563. godine *Bartolomeo Eustachio*, pa joj je odatle naziv. Ovalni prozorčić otkrio je 1561. godine *Gabriello Fallopio*. Njegovo su otkriće i polukružni kanali te pužnica, koju je nazvao *cochlea*. Fallopio je držao kako je pužnica ispunjena zrakom. Slično tome mislili su već u staro vrijeme grčki učenjaci tvrdeći da je u uhu hermetički zatvorena kesica ispunjena zrakom koji pojačava zvuk. Tek dva stoljeća poslije Fallopija, 1760. godine *Domenico Cotugno* iznosi novu tezu, koju je dokazao 1777. *Philipp Friedrich Meckel*, izloživši pužnicu hladnoći i pokazavši kako je u njoj nastao led. Otkriće mikroskopa omogućilo je dalji napredak u proučavanju unutrašnjeg uha. Pomoću njega je *Alfonso Corti* 1851. godine upoznao građu pužnice, pa tako i nitne stanice u kojima se zvučna energija pretvara u električku.



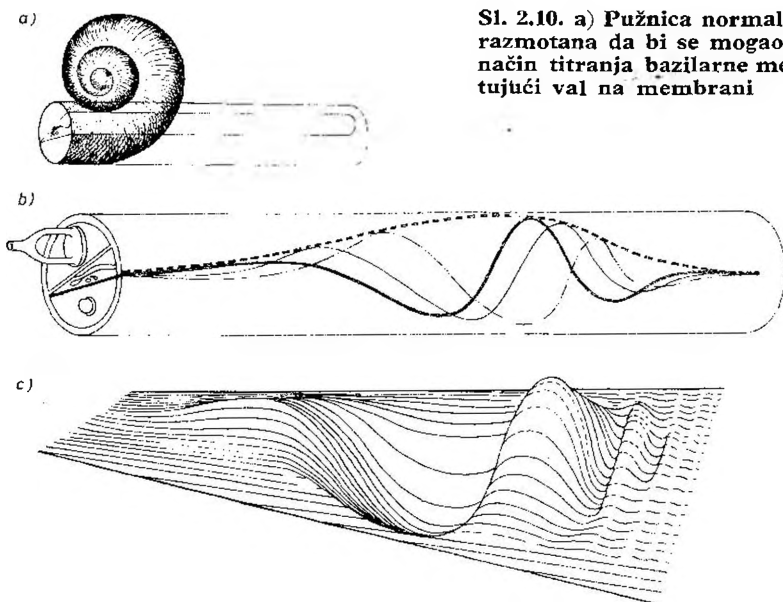
Sl. 2.9. Presjek Cortijeva organa

2.2.2. Slušni proces

Upoznavši osnovnu građu uha možemo nešto reći i o tome kako se odvija slušni proces. Treba odmah istaknuti da znanost do danas još ne može sigurno odgovoriti na mnoga pitanja. Ipak, tok slušnog procesa u načelu je poznat, pa ćemo ga ukratko izložiti.

Titraje bubnjića prenose slušne koščice na pločicu ovalna prozorčića. Time se zvučna energija, primljena bubnjićem prenosi na tekućinu u unutrašnjem uhu. Hidraulički tlačni val izazove titranje bazilarne membrane. Budući da je ona na svome početnom dijelu kruta i zategnuta, a prema kraju mlohava i debela, to će mjesto njezinih najvećih titrajnih pomaka ovisiti o frekvenciji. Visoke frekvencije izazvat će najveće gibanje na početnom dijelu, a niske na završnome. Sl. 2.10. prikazuje kako se savijanje bazilarne membrane prenosi s njezina početka prema kraju. Pod utjecajem hidrauličkoga tlačnog vala nastaje dakle, na njoj putujući val. Njegova

se amplituda postupno povećava, postiže maksimum, a zatim naglo pada*. Po mjestu maksimuma uho utvrđuje frekvenciju primljenog zvuka. Bazilarna membrana prostorno, po svojoj duljini, razlaže kompleksni val u sinusoidne komponente — ona je spektralni analizator slušnog organa.



Sl. 2.10. a) Pužnica normalno savijena i b) razmotana da bi se mogao bolje prikazati način titranja bazilarne membrane. c) Putujući val na membrani

U Cortijevu su organu *cilijarne stanice* iz kojih strše dlačice, *cilije*. U unutrašnjem redu ima oko 3 500 stanica, a u vanjska tri reda oko 20 000. Vrhovi dlačica zabodeni su u tektorijalnu membranu koja je iznad njih. Kad se bazilarna membrana savija, dlačice se na razne načine deformiraju: svijaju se, zakreću, bivaju vučene i pritiskivane. Zbog toga mehaničkog naprezanja stvara se u cilijarnim stanicama elektricitet. Ti električki signali podražuju slušni živac. Cilijarne su stanice prema okolnoj tekućini nabijene na *negativni istosmjerni potencijal*** od oko 80 mV. To je razlog da za vrijeme dok nema akustičkog podražaja kroz njih teče konstantna istosmjerna struja. Preko cilijarnih stanica akustički signali moduliraju tu struju. Priključe li se elektrode dobiva se struja kojoj je valni oblik jednak onome što ga ima akustički signal. Ako je to govorni signal, u reprodukciji preko pojačala i zvučnika govor je razumljiv. Takva struja ne teče kroz živac; njegova struja je impulsna.

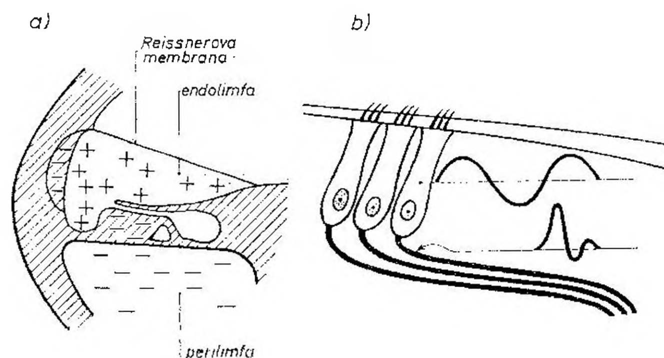
---

* Najveće amplitude bazilarne membrane izvanredno su malene. Uz zvučni tlak od 1 μbar one iznose 1 nm, što je trideset puta veće od promjera atoma. Iz toga se može zaključiti kako je golema osjetljivost stanica u Cortijevu organu. Uzduž bazilarne membrane, duge od 30 do 35 mm, val se proširi u 5 ms. Znači, brzina širenja vala jest 5 do 6 m/s.

** Izvor endokohlearnog potencijala je *stria vascularis*. To je naziv stijenke kohlearnog kanala *scala media*. U toj stijenki nalazi se sustav krvnih kapilara iz kojih se u endolimfu izlučuje kalij. Nastanak električnih napona u uhu tumači se ionskom teorijom membranskih potencijala prema *Hodgkinu* i *Huxleyu* koji su za taj svoj znanstveni doprinos dobili Nobelovu nagradu.

Ono prvo je *kohlearna mikrofonska struja,* a drugo, kao njezina posljedica, *živčana akciona struja.* Iz toga se može zaključiti da slušni živac ne prenosi u mozak struje valnog oblika akustičkog signala, već strujne impulse (sl. 2.11). Signal se, dakle, prenosi u *kodiranom* obliku, on je *pulsno-frekvencijski* moduliran. Brzina kojom impuls prolazi kroz živac varira između 1 do 100 m/s, ovisno o njegovu presjeku, ali je ona u pojedinoj živčanoj niti konstantna.

Kodiranjem se služimo i u svakodnevnom životu, kao npr. pokretima glave ili ruke prenosimo neku poruku. Pri tome oni imaju stanovito značenje koje sugovornik razumije. Specijalan je primjer kodiran prijenos slike na vrlo velikim udaljenostima. Svemirska letjelica *Mariner IV* odašiljala je slike Marsa šaljući radio-vezom brojeve. Svaka se slika sastojala od 40000 točaka, a svaka je točka mogla imati jedan od 64 stupnja sive boje, uključujući crno i bijelo. Pojedini stupanj sivoće označen je bio svojim brojem. Primljene brojeve kompjutor je pretvorio u sliku.



Sl. 2.11. a) Raspodjela električnog naboja u kohleji. b) Uz sinusoidni zvučni tlak električki je signal u cilijarnim stanicama također sinusoidan. No, u živčanim nitima koje vode u mozak električki je signal impulsan.

Slušni živac što povezuje uho s mozgom zapravo je snop živčanih niti — ima ih oko trideset tisuća — koje u cilijarnim stanicama imaju živčane završetke — tzv. *neurone.* Ako je podražaj dovoljno jak, neuron se aktivira i šalje električke impulse. Uz slab podražaj reakcije nema. Prema tome, taj sustav radi na principu „*da*" ili „*ne*". Jači zvučni signal aktivira veći broj neurona. Neuronski impulsi imaju praktički jednake vršne vrijednosti. Broj impulsa u sekundi ne premašuje 400, ali u početnoj desetinki sekunde poraste i na 1000. To je najveći broj impulsa što ga može poslati jedan neuron jer se za vrijeme kraće od tisućinke sekunde živčana „baterija" ne može nabiti.

Informaciju o frekvenciji dobiva slušni mehanizam na temelju mjesta s najvećim titrajnim pomacima bazilarne membrane, na osnovi slike neuronskih impulsa ili kombinacijom obaju činilaca. Na frekvencijama do 400 Hz bazilarna membrana titra kao cjelina, pa aktivnim cilijarnim stanicama nije pridijeljeno neko specifično područje. Te su frekvencije dovoljno niske da svaki titraj može izazvati jedan impuls. Glasnoću određuje broj sinkrono izazvanih impulsa, kojih se brojnost povećava u smjeru niskih frekvencija na bazilarnoj membrani. Od 400 do 5000 Hz postaje oštrije lokaliziranje mjesta najvećih titrajnih pomaka mem-

brane. Budući da je frekvencija suviše visoka da bi se moglo ostvariti sinkrono aktiviranje, to se npr. na frekvenciji od 500 Hz impuls pojavljuje pri svakome drugom titraju, na onoj od 1000 Hz pri svakome trećem itd. Iznad 5000 Hz selektivnost je bazilarne membrane velika* jer je područje maksimalnih titrajnih pomaka usko. Glasnoća i tu ovisi o broju impulsa u sekundi.

Iako unutrašnje uho samo po sebi nema veliku frekvencijsku selektivnost, analizatorska je sposobnost slušnog mehanizma velika. To se tumači djelovanjem negativne povratne veze od mozga prema uhu preko posebnih živčanih kanala. Kako mozak dekodira signale koje impulsima prima, i kako ih pretvara u slušni osjet, do danas nije razjašnjeno.

Kako uho prima složene zvučne pojave prvi je istraživao *G. S. Ohm*, otkrivač proporcionalnosti između napona i struje u metalnih vodiča (Ohmov zakon). Prema Ohmu jednostavno titranje zraka uho čuje kao čisti ton, dok složena titranja uho razlaže u niz jednostavnih titranja koja čuje kao niz tonova. No uho ipak nije takav idealan analizator jer ima ograničenu selektivnost i karakteristika mu nije linearna.

Tvorac teorije putnih valova na bazilarnoj membrani jest *Georg von Békésy*. Kao telekomunikacijski inženjer u Budimpešti on je 1928. godine, radeći na poboljšanju telefonskih aparata, postavio sebi pitanje koliko ljudsko uho nadmašuje telefonski sustav. Da bi to istražio, sagradio je mehanički model kohleje. To je bila cijev s prorezom po duljini, a preko proreza bila je napeta membrana. Cijev je napunio vodom i u njoj pobudio zvučne valove. Zapazio je da membranom putuje ispupčenje, najveće na njezinu određenom mjestu. Pokusima na ušima životinja, pa i na uhu mrtva čovjeka, ustanovio je da se i na bazilarnoj membrani pojavljuju putni valovi, koji na stanovitom mjestu imaju svoj maksimum. Također je ustanovio da po mjestu maksimuma uho utvrđuje frekvenciju primljenog zvuka i da visokim frekvencijama pripada početni dio bazilarne membrane, a niskima završni. Za istraživanja putnih valova u unutrašnjem uhu dobio je Georg von Békésy 1961. godine Nobelovu nagradu.

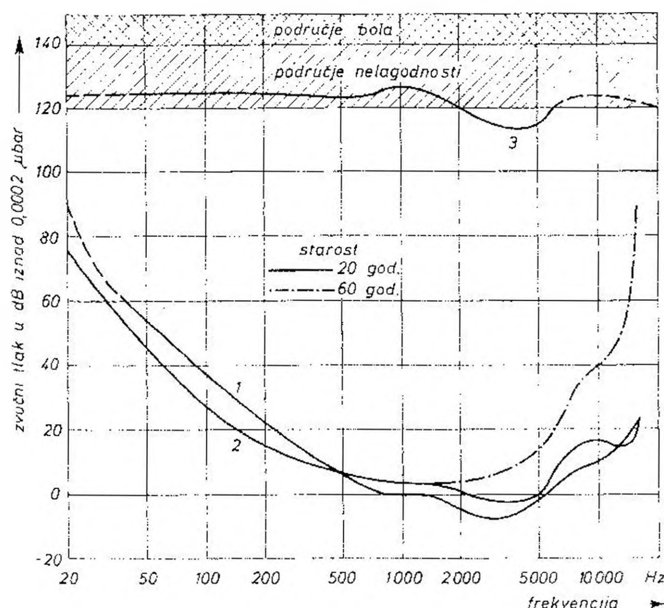
Električke potencijale u uhu otkrio je 1930. godine *E. G. Wever* i njegov suradnik *C. W. Bray*.

---

* U slona, najveće kopnene životinje, bazilarna membrana ima duljinu od blizu 60 mm. Oštrina rezonancije naročito joj je visoka. Na frekvencijama iznad 500 Hz može se pri mijenjanju frekvencije pomak rezonancijskog mjesta vidjeti golim okom jer uz pogodno ugođenu amplitudu širina dijela koji titra iznosi samo nekoliko milimetara. Budući da je mozak slona relativno malen prema dimenzijama glave slušni kanal je iznimno dugačak, čak 18 do 20 cm. Promjer slušnog kanala je 1 cm, s proširenjem u blizini bubnjića. Eliptični bubnjić ima visinu od 3 cm i širinu od 2 cm. Pločica stremena ima dulju os od 5,3 mm i kraću od 3,8 mm.

2.3.1. Pragovi sluha

Svakoj čujnoj frekvenciji odgovara najniži zvučni tlak koji uho još čuje. Taj je tlak, kao što se vidi iz dijagrama na sl. 2.12, ovisan o frekvenciji. Da bi se na frekvenciji od 30 Hz došlo do praga čujnosti, treba uhu privesti zvučni tlak koji je punih 60 dB viši od onoga na pragu čujnosti frekvencije od 1 000 Hz.



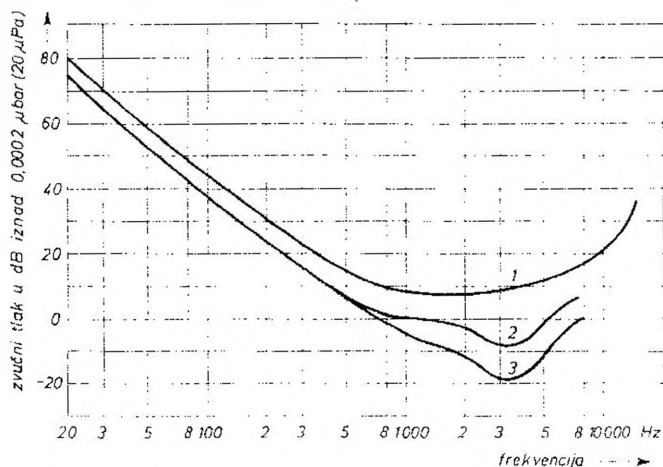
Sl. 2.12. Slušna ploha ljudskog uha. Krivulja 1 označuje prag čujnosti prema Fletcheru, a krivulja 2 prema Robinsonu i Dadsonu. Krivulja 3 (prag bola, prema Fletcheru) praktička je granica do koje su uho smije opterećivati.

Koliko god je mjerenje praga čujnosti u principu jednostavno, ipak ima velikih teškoća prilikom mjerenja na frekvencijama nižima od 30 Hz. U tom su području potrebni veliki zvučni intenziteti, pa je teško izbjeći pojavu harmonika. Budući da uho ne razlikuje oštro visinu tona na niskim frekvencijama, lako se može harmonik zamijeniti osnovnim tonom. Kad bi izvor zvuka čak i proizvodio čist ton, zbog nelinearnosti slušnog mehanizma, što ćemo poslije izložiti, može se uhu pričiniti da čuje osnovnu frekvenciju koja je stvarno nečujna. Stoga su rezultati mjerenja praga čujnosti na frekvencijama nižima od 30 Hz posve nepouzdani.

Na visokofrekvencijskom području krivulja se praga čujnosti vrlo naglo diže. Na kojoj frekvenciji nastaje prekid, vrlo se mnogo razlikuje od slušača do slušača naročito kod osoba starijih od 30 godina. Mladi ljudi čuju frekvencije do 20000, Hz, neki čak i do 25 000 Hz. Osobe s više od 50 godina rijetko čuju frekvencije iznad 15 000 Hz, a katkad ni one koje su više od 10 000 Hz.

Priroda je uho učinila toliko osjetljivim da bi se uz još niži prag čujnosti u području srednjih frekvencija čulo *Brownovo molekularno gibanje* kao stalno šuštanje. Povećana osjetljivost uha na niskim frekvencijama imala bi za posljedicu da bi čovjek trajno slušao kolanje svoje krvi i rad srca.

Oblik krivulje praga čujnosti i njezin položaj u koordinatnom sustavu zvučni tlak — frekvencija ovisi o načinu kako se mjeri razina zvučnog tlaka. To se može provesti u samome slušnom kanalu, zatim u slobodnome zvučnom polju, kad se slušač iz njega makne. Na pragu čujnosti zvučni tlak ovisi i o smjeru upada zvuka i o tome sluša li se s oba uha ili samo jednim. Iz krivulja na sl. 2.13. vidi se kolika je razlika uz različite načine mjerenja. Krivulje su valovite zbog difrakcije zvučnih zraka oko glave*.



Sl. 2.13. Različiti načini mjerenja daju različite krivulje praga čujnosti. Krivulja 1 odnosi se na slušanje jednim uhom preko slušalice uz mjerenje zvučnog tlaka u blizini bubnjića. Krivulje 2 i 3 dobivene su binauralnim slušanjem, a zvučni tlak je mjeren u zvučnom polju bez prisutnosti ispitanika. Pri mjerenju krivulje 2 izvor je zvuka bio na stanovitoj udaljenosti ispred ispitanika. Krivulja 3 dobivena je tako da je veći broj izvora zvuka bio u horizontalnoj ravnini nepravilno raspoređen oko ispitanika (prema Beraneku).

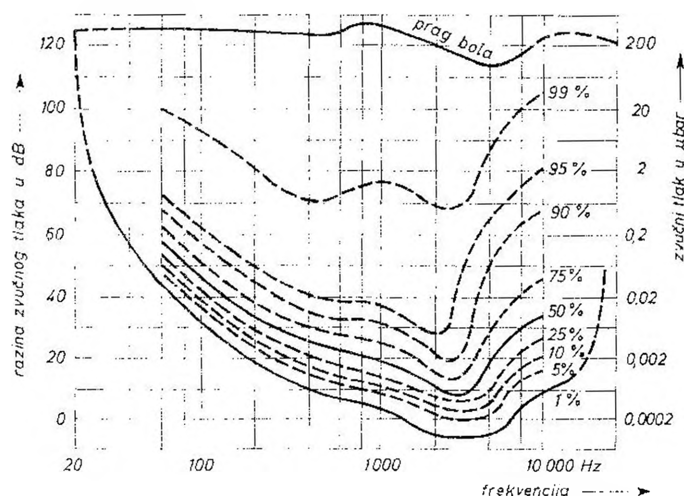
Na pragu čujnosti u frekvencijskom području najveće osjetljivosti sluha zvučna energija nije dovoljno velika da bi pobudila živčane struje. Prema tome, energija se u uhu pojačava. Efekt pojačavanja osniva se na principu poznatom kod ugljenog mikrofona (*Davis*, 1965) u kojem je izlazna električka energija i do tisuću puta veća od primljene zvučne energije. Ulogu mikrofonskih ugljenih zrnaca imaju u uhu cilije. Kroz njih iz biološke baterije teče istosmjerna struja. Kad se cilije djelovanjem zvuka savijaju mijenja se njihov električki otpor. Na taj način zvučna energija modulira istosmjernu struju, odnosno istosmjernu električku energiju, pa se dobiva električki signal posve sličan zvučnom, i još k tome energetski pojačan.

*U svom članku „How Loud is Silence?" (AUDIO, March, 1956) *C. E. White* upozorava da tako veliku osjetljivost sluha kao što je u području iznad 1 000 Hz pokazuje krivulja *3* na sl. 2.13. mjerenjem nije dobio nijedan autor. U istom članku iznosi objašnjenje koje mu je u razgovoru dao dr Beranek: „Sasvim je moguće da krivulja br. 3 u mojim knjigama nije krivulja koja se može dobiti mjerenjem jer je ona nastala drukčijim postupkom. Ja sam uzeo prag čujnosti koji je objavilo Američko udruženje za standarde, i od njega oduzeo razliku između binauralne krivulje koja se dobiva s izvorom zvuka ispred ispitanika, i binauralne krivulje dobivene iz više izvora nepravilno raspoređenih u horizontalnoj ravnini oko glave ispitanika. Prema tome, krivulja br. 3 je izvedena krivulja, a ne izmjerena."

Krivulje pragova čujnosti lijevog i desnog uha nisu identične. Vrlo je rijetko da se one poklapaju u nekome užem frekvencijskom području, mnogo češće se sijeku na više mjesta. Prema tome, krivulja praga čujnosti snimljena slušanjem s oba uha zapravo je sastavljena od dijelova krivulja boljeg uha.

Prag je čujnosti vrlo različit, i to kod ljudi za koje se smatra da imaju normalan sluh. Štoviše, kod iste se osobe on mijenja iz dana u dan, od sata do sata. Poslije djelovanja buke, makar i tihe, prag čujnosti se diže*.

Oštrinu sluha masovno su mjerili 1939. godine u laboratorijima *Bell Telephone* prigodom Svjetske izložbe u San Franciscu. Tom prilikom napravljeno je oko pola milijuna snimaka sluha. Rezultati su na sl. 2.14. Krivulje označene sa 1%, 5%, 10%, 25% itd. prema gore ograničuju zvučne tlakove, što ih je 1%, 5%, 10%, 25% itd. svih ispitanika moglo čuti kao tonove. Tako krivulja 50% označuje granicu ispod koje su zvučni tlakovi koje je polovica ispitanika mogla čuti, a za drugu polovicu ispitanika bilo je potrebno zvučne tlakove povisiti na vrijednosti iznad krivulje da osjete zvuk.



Sl. 2.14. Karakteristike koje pokazuju koliki postotak ljudi može čuti zvučne tlakove ispod naznačene razine kao tonove. Razlika između 100% i postotka naznačenoga uz krivulje daje postotak ljudi za koje je pripadna krivulja karakteristika praga čujnosti.

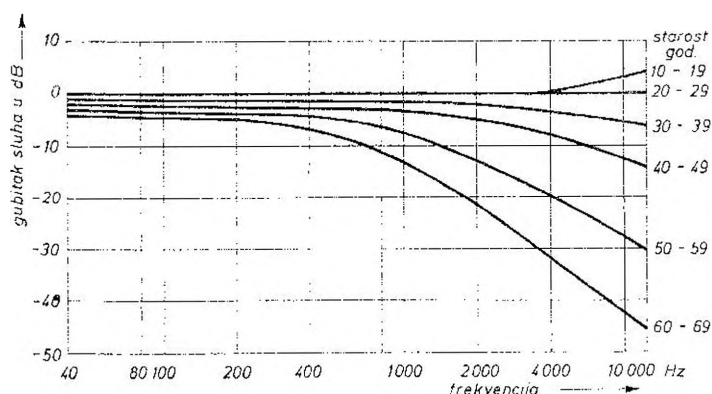
Različitost krivulja koje predočuju ovisnost praga čujnosti o frekvenciji, nametala je potrebu da se odabere jedna koja će služiti kao norma. To je učinjeno tako da je za prag čujnosti na frekvenciji od 1 000 Hz odabran zvučni intenzitet od 10^{-12} W/m², što odgovara zvučnom tlaku od $2 \cdot 10^{-4}$ μbar (točno $2{,}04 \cdot 10^{-4}$ μbar) ili 20 μPa.

*U frekvencijskom području između 3000 Hz i 5000 Hz sluh ima najveću osjetljivost. Prema proračunima je u tom frekvencijskom području zvučni tlak Brownovog molekularnog gibanja samo za blizu 15 dB niži od praga čujnosti (na temperaturi od 27 °C).

Novija mjerenja mnogih autora pokazala su da je prosječni prag čujnosti viši od onoga prema *Fletcheru* i *Munsonu*. Stoga je novi normirani prag čujnosti pri frekvenciji od 1 000 Hz za 3 dB viši od prije usvojenoga. Razumije se da i nova krivulja praga čujnosti prolazi tom točkom. Samo se nije mijenjao dogovoreni referentni zvučni tlak, koji je ostao na vrijednosti od $2 \cdot 10^{-4}$ μbar ili 20 μPa.

Kao što na pojedinim frekvencijama postoji najniži zvučni tlak koji uho još čuje kao ton, tako će biti i najviši zvučni tlak koji se na pojedinim frekvencijama smije privesti uhu, a da se ne osjeća neugodnost ili da se ono ne ošteti. Taj se zvučni tlak naziva *pragom bola*. Gornja krivulja na sl. 2.14. prikazuje kako prag bola ovisi o frekvenciji. Taj je prag na zvučnom tlaku koji je više od milijun puta (više od 120 dB) viši od nulte razine. Tlakovi na pragu bola ne uzrokuju u svim frekvencijskim područjima bol u uhu, već na nekima neugodan osjećaj, na drugima škakljanje, a na trećima bol. Ni taj prag, kao ni prag čujnosti, nije jednak u svih ljudi zdrava sluha, već prilično varira, ali ne toliko kao prag čujnosti.

Krivulja praga čujnosti mijenja se s dobi. Općenito se može reći da se on na višim frekvencijama sa starošću podiže, što znači da se u tom području gubi sluh. Na sl. 2.15. vidi se koliko u prosjeku iznosi gubitak sluha u osoba razne dobi. Tu je referentni prag čujnosti onaj što ga imaju osobe između 20. i 30. godine.

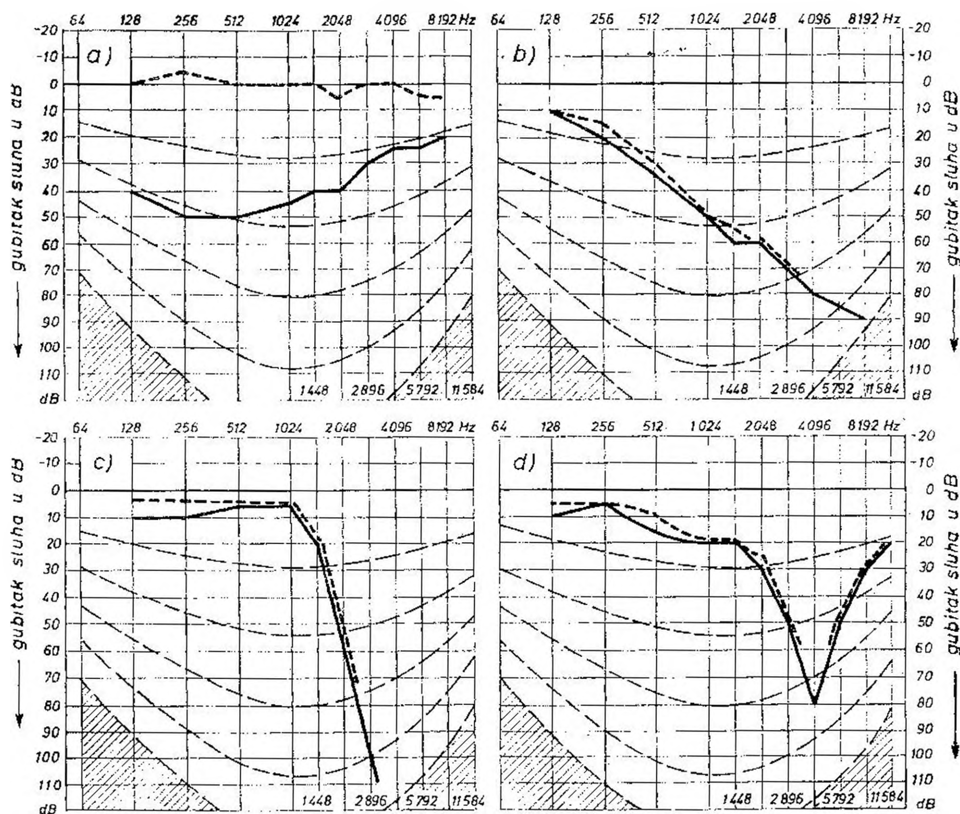


Sl. 2.15. Frekvencijske karakteristike gubitka sluha ovisno o dobi muških osoba. U žena je gubitak sluha općenito manji.

Promjene karakteristika praga čujnosti mogu nastati i zbog mehaničkog ili akustičkog oštećenja uha, zbog bolesti uha ili prirođenog defekta. Dvije su vrste nagluhosti ili gubitka sluha: *konduktivna* i *perceptivna nagluhost*. Prvoj je uzrok zatvaranje slušnog kanala ili mehanička nepokretljivost bubnjića i slušnih koščica. Pri tome najveći gubitak sluha ne premašuje 55 dB. Perceptivna nagluhost posljedica je degeneracije cilijarnih stanica ili živčanih završetaka u pužnici, odnosno degeneracije slušnog živca. Ima još i treća vrsta nagluhosti, koja je posljedica abnormalnog rada mozga. Konduktivna i perceptivna nagluhost, ili kombinacija obiju, mnogo su češće.

Gubitak sluha mjeri se *audiometrom*. U načelu se on sastoji od generatora sinusoidnog napona, kalibriranog potenciometra i slušalice. Uređaj se baždari ispiti-

vanjem osoba normalna sluha. Prilikom ispitivanja nagluhe osobe treba, s obzirom na zdravo uho, pomoću potenciometra povisivati glasnoću određenog tona u slušalici dotle dok ispitivana osoba dade znak da je ton čula. Na taj način ustanovljeni gubitak naznačuje se u decibelima. Krivulja koja se dobiva spajajući točke gubitka na pojedinim frekvencijama naziva se *audiogram*.

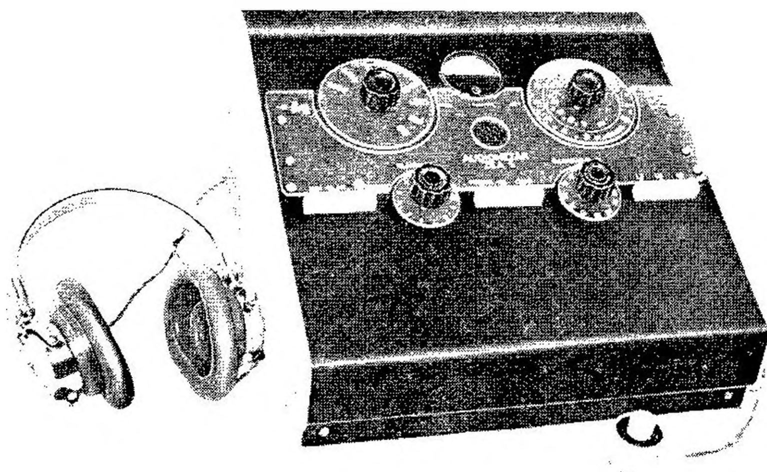


Sl. 2.16. Audiogrami tipični za razne vrste nagluhosti. Puna linija odnosi se na zračnu vodljivost, a crtkana na koštanu. a) Konduktivna nagluhost. b) Perceptivna nagluhost s kosim padom i c) sa strmim padom. d) Nagluhost s uleknućem na tonu c⁵ (oko 4000 Hz)

U medicinskoj audiologiji dijagram se praga čujnosti nagluhe osobe prikazuje drukčije nego u akustici. Da bi se dobila veća preglednost, prag se čujnosti zdrava uha predočuje horizontalom. Gubitak sluha u lijevom ili desnom uhu (za svako u posebnom dijagramu) izražen u decibelima nanosi se ispod horizontale (sl. 2.16). Tako snimljena krivulja omogućuje da se na prvi pogled dobije slika o tome koliki je stupanj oštećenja i kakva je njegova vrsta.

Na sl. 2.17. vidi se izvedba audiometra za ambulantne svrhe.

Nagluhe osobe mogu pratiti govor, ponekad i glazbu, uz upotrebu *slušnih aparata*. To su minijaturna pojačala s mikrofonom i slušalicom, koja imaju određene karakteristike prilagođene vrsti i karakteristici nagluhosti. Kad je oštećeno srednje, a sačuvano unutrašnje uho, dovodi mu se zvuk preko *vibratora* prislonjenoga na kost iza ušne školjke.



Sl. 2.17. Ambulantni audiometar (Zavod za elektroakustiku Elektrotehničkog fakulteta u Zagrebu)

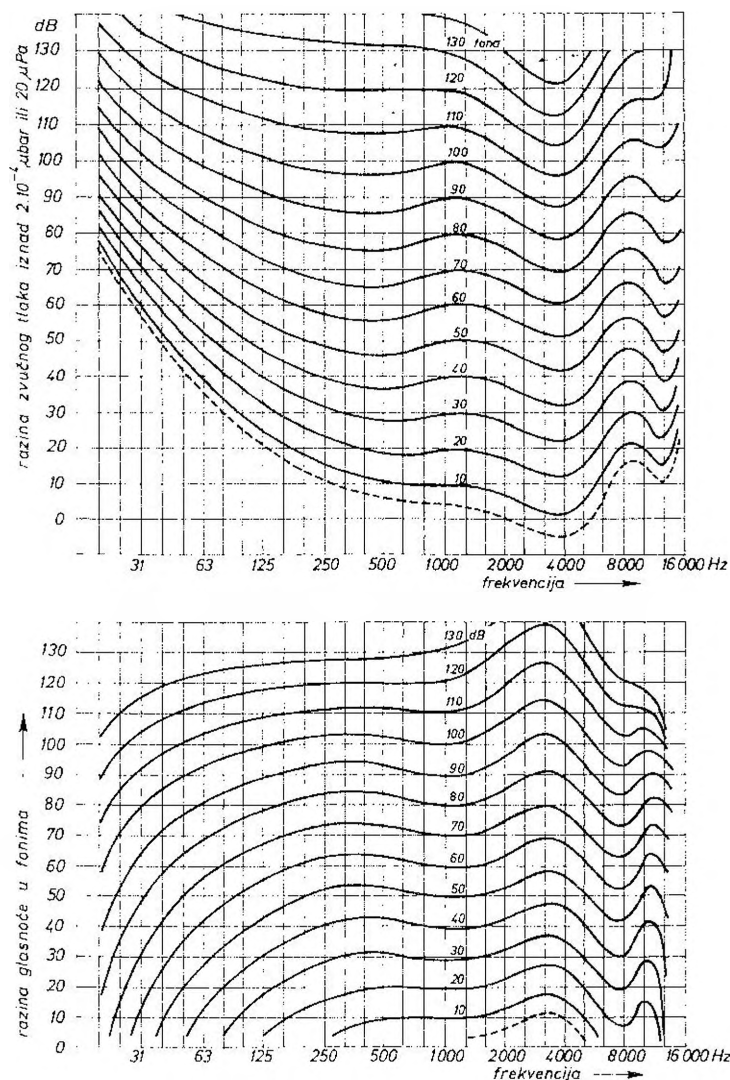
2.3.2. Glasnoća

Prag je čujnosti u raznim frekvencijskim područjima na vrlo različitim tlakovima. Ovisnost je praga o frekvenciji dakle vrlo velika. To načelno vrijedi i za zvučne tlakove iznad praga čujnosti. Dva tona jednakih zvučnih tlakova, ali različitih frekvencija, općenito nemaju jednaku glasnoću.

U tehničkoj se akustici glasnoća nekog zvuka mjeri uspoređujući je s glasnoćom tona frekvencije od 1 000 Hz. Za ljestvicu zvučnih tlakova na toj frekvenciji uzeta je skala decibela, s nultom vrijednošću na referentnome zvučnom tlaku od $2 \cdot 10^{-4}$ μbar ili 20 μPa. Mijenjajući zvučni tlak na toj frekvenciji može se na temelju *slušnog uspoređivanja* ugoditi ista glasnoća koju ima mjereni zvuk. Ako se takvom usporedbom dobije da mjereni zvuk ima istu glasnoću kao ton frekvencije od 1 000 Hz na razini zvučnog tlaka od 80 dB iznad referentne razine, onda se govori da mjereni zvuk ima razinu glasnoće od 80 fona. *Fon* je, dakle, jedinica za razinu glasnoće.

Za frekvencije čistih tonova iznad i ispod 1 000 Hz fonska ljestvica nije i skala decibela. Tu valja izvesti poredbena mjerenja i utvrditi uz koji se zvučni tlak dobiva glasnoća jednaka onoj koju ima ton frekvencije od 1 000 Hz. Tako je utvrđeno da npr. ton frekvencije od 100 Hz ima glasnoću od 80 fona pri zvučnom tlaku od 85

dB iznad referentne razine. Nasuprot tome, da bi se dobila ista glasnoća od 80 fona, treba pri frekvenciji od 3 500 Hz razinu zvučnog tlaka sniziti na 70 dB. Rezultate mjerenja pomoću čistih tonova za cijelu *slušnu plohu* između praga čujnosti i praga bola prikazuju krivulje u dijagramu na sl. 2.18. To su *krivulje jednake razine glasnoće* ili *izofone.*



Sl. 2.18. Gore: izofonske krivulje prema Robinsonu i Dadsonu Dolje: krivulje koje pokazuju ovisnost razine glasnoće o frekvenciji uz konstantne razine zvučnih tlakova

Različiti autori dobili su na osnovi svojih mjerenja ponešto različit oblik izofona. Stoga je, radi praktičke upotrebe, *Međunarodna organizacija za standardizaciju ISO (International Standards Organisation)* preporučila krivulje na sl. 2.18, što su ih snimili *Robinson* i *Dadson*. Najniža, crtkana krivulja ne izražava nultu vrijednost jer se pri frekvenciji od 1 000 Hz nalazi oko 3 dB iznad referentne razine zvučnog tlaka na kojoj počinje skala decibela. Ta krivulja je, jednostavno, prag čujnosti.

Krivulje jednake razine glasnoće ili izofonske krivulje dobivene su za čiste tonove mjerenjem uz određene uvjete, na što valja obratiti pažnju pri njihovoj upotrebi. Ti uvjeti su ovi:

a) izvor zvuka mora biti točno ispred ispitanika;
b) zvučni val koji dolazi do ispitanika treba da bude slobodni progresivni ravni val;
c) zvučni se tlak mjeri na mjestu ispitanika u njegovoj odsutnosti;
d) sluša se s oba uha, binauralno;
e) ispitanik je otološki normalna osoba u dobi od 18 do 25 godina.

Kako bi se dobila stanovita predodžba o skali glasnoće, tablica 2.1. sadrži razine glasnoće različitih zvukova, šumova i buke.

Tablica 2.1.

Stupanj glasnoće	Razina zvučnog tlaka dB	Zvučni tlak μbar	Zvučni intenzitet W/m²	Tipični primjeri
Bolno	140	2 000	10^{2}	prag bola
	130			
	120	200	1	pneumatska bušilica
Zaglušujuće	110			glasna auto-truba (1 m)
	100	20	10^{-2}	vrlo bučna tvornica
Vrlo glasno	90			teški dizelski kamion (5 m)
	80	2	10^{-4}	unutrašnjost autobusa
Glasno	70			prosječan promet
	60	0,2	10^{-6}	običan razgovor
Umjereno glasno	50			tipična uredska prostorija
	40	0,02	10^{-8}	dnevna soba
Tiho	30			knjižnica
	20	0,002	10^{-10}	spavaonica noću
Vrlo tiho	10			radio-studio
	0	0,000 2	10^{-12}	prag čujnosti

Frekvencijska karakteristika nekoga prijenosnog sistema može se dvojako mjeriti. Najčešće se to izvodi tako da se amplituda ulaznog signala održava konstantnom, a mjeri se ovisnost amplitude o frekvenciji na izlazu. Prema drugom načinu, uz konstantnu amplitudu izlaznog signala mjeri se ovisnost amplitude o frekvenciji ulaznog signala. Slušni sistem može se samo tako mjeriti, pri čemu je konstantni izlazni signal konstantna razina glasnoće, a o frekvenciji ovisni ulazni signal jest zvučni tlak.

Krivulje koje daje prvi način mjerenja mogu se za slušni sistem dobiti konstrukcijom iz krivulja dobivenih drugim načinom. Treba samo potražiti koje razine glasnoće pripadaju pojedi-

nom konstantnom zvučnom tlaku i unijeti ih u novi dijagram. Tako su dobivene krivulje u dijagramu na sl. 2.18, dolje. Obje vrste krivulja — one za konstantne razine glasnoće ili izofone i one za konstantni zvučni tlak — frekvencijske su karakteristike sluha. Prve možemo nazvati „prigušnim", a druge „propusnim" karakteristikama.

Uz poznati zvučni intenzitet ili zvučni tlak na frekvenciji od 1 000 Hz može se razina glasnoće L izračunati:

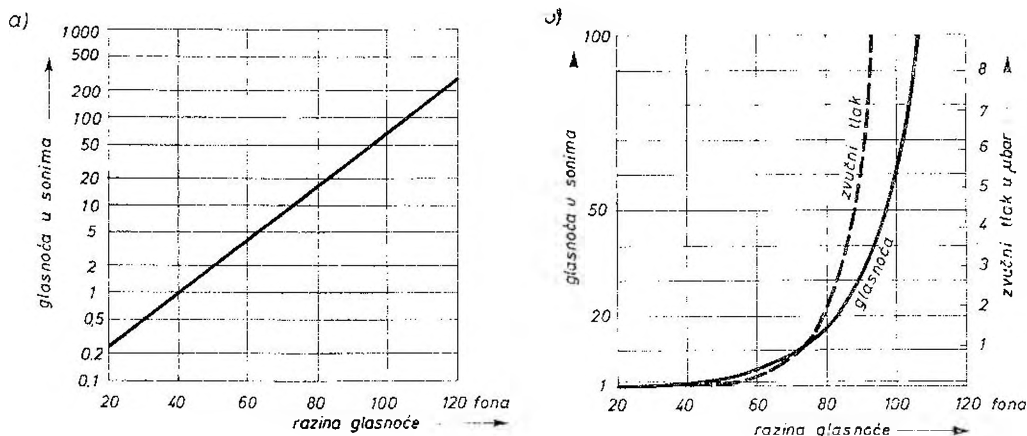
$$L = 10 \log \frac{I}{I_0} = 20 \log \frac{p}{p_0} \text{ (fona)} \tag{2.1}$$

Za I_0 uvrštava se referentni zvučni intenzitet od 10^{-12} W/m^2, a za p_0 referentni zvučni tlak od $2 \cdot 10^{-4}$ μbar. Zvučni tlak od 1 μbar daje na frekvenciji od 1 000 Hz prema formuli (2.1) razinu glasnoće:

$$L = 20 \log \frac{1}{2 \cdot 10^{-4}} = 74 \text{ fona}$$

Za druge frekvencije ne može se računati prema ovim formulama, pa se treba poslužiti izofonskim krivuljama.

Fonska ljestvica ima za osnovu skalu decibela. U mjernoj tehnici to je svakako prednost. No ta skala ne otkriva kako uho razlikuje glasnoće. Na primjer, ako moto-



Sl. 2.19. a) Ovisnost glasnoće u sonima o razini glasnoće u fonima. Skala sona je logaritamska (ISO-preporuka R131-1959). b) Zvučni tlak i glasnoća u sonima ovisno o razini glasnoće u fonima. Skala sona i tlakova u mikrobarima linearna

cikl proizvodi buku glasnoće od 80 fona, buka dvaju takvih vozila neće biti dvostruka, već samo za 3 fona viša, dakle 83 fona. Smanjenje buke nekog izvora sa 100 na 90 fona, dakle 10%-tni pad, uho će osjetiti kao mnogo veće smanjenje jer će glasnoća buke biti dva puta niža. Očita neprikladnost fonske ljestvice potrebama ocjenjivanja glasnoće uzrokovala je da se nađe druga skala koja bi polazila od osobina sluha. Zapaženo je da ispitanici mogu ponovljivo ugoditi dva puta višu ili upola nižu glasnoću nekog zvuka. Kao uvijek u psihoakustičkim mjerenjima, i ovom prilikom su se pokazale razlike u rezultatima koje su dobili razni autori. Nakon kritičkog razmatranja Međunarodna organizacija za standardizaciju ISO odlučila se za dijagram na sl. 2.19.*a*. U njemu porastu razine glasnoće za 10 fona odgovara povi-

šenje glasnoće na dvostruk broj sona. Uvedena je dakle nova jedinica — *son*. Prema definiciji, razini glasnoće od 40 fona odgovara glasnoća od 1 sona. Prema tome, razini glasnoće od 50 fona odgovara glasnoća od 2 *sona*, 60 fona jednako je 4 *sona*, 70 fona je 8 *sona* itd. Matematički izraz za ovisnost između razine glasnoće L_f i glasnoće L_s glasi:

$$L_f = 40 + 33 \log L_s \qquad (2.2)$$

Dijagram na sl. 2.19.*a* i formula (2.2) vrijede za područje od 20 do 120 fona.

Kao što je već napomenuto, rezultati što su ih dobili razni autori prilično se razlikuju. Stoga ovu ISO preporuku treba shvatiti kao približan proračun glasnoće koji daje *ISO-glasnoću* u *ISO-sonima*.

Jedna od metoda kojima se dobiva skala za glasnoću osniva se na pretpostavci da se binauralnim slušanjem dobiva dva puta veća glasnoća nego monoauralnim. Od ispitanika se prilikom mjerenja zahtijeva da, slušajući neki ton preko slušalica izmjenično, ugodi jednaku glasnoću. Tad se te glasnoće odnose kao 2 : 1. Pokus se ponavlja na cijelom opsegu glasnoća.

U drugoj metodi upotrebljavaju se pri mjerenju dva tona posve različitih frekvencija, i to zato što se pretpostavlja da se istodobnim stimuliranjem bazilarne membrane na dva različita mjesta dobiva aditivno djelovanje. Oba se tona, svaki posebno, ugode na istu glasnoću, a zatim se slušaju zajedno i ugađaju na glasnoću koju ima pojedini ton. Kad se glasnoće izjednače, onda je pojedinačan ton dva puta glasniji od svake komponente kompleksnog tona. Izvedeni su pokusi i s više tonova, pa je uspjelo odrediti i odnose glasnoća 10 : 1.

2.3.3. Prag razlikovanja zvučnog intenziteta

Kad se mijenja intenzitet nekog zvuka, mora promjena premašiti određenu granicu da bi uho to osjetilo kao promjenu glasnoće. Prag razlikovanja zvučnog intenziteta ovisi o frekvenciji i o jakosti, ali i o metodi mjerenja i nekim drugim činiocima. Mjerenja provedena metodom amplitudne modulacije čistih tonova frekvencijom od 4 Hz (za tu modulacijsku frekvenciju uho je najosjetljivije!) pokazala su da na razini glasnoće od oko 20 fona naš sluh zamjećuje stupanj modulacije od 0,1 (ukupna promjena od 2 dB), a na razini od 100 fona upravo zamjetljivi stupanj amplitudne modulacije pada na deset puta manji iznos — svega 0,01 (ukupna promjena zvučnog tlaka od 0,2 dB). Na razini glasnoće od 30 do 80 fona prag razlikovanja intenziteta kontinuiranog šuma iznosi oko 0,4 dB. Slušaju li se kompleksni zvukovi kao govor ili glazba, zamjetljiva promjena zvučnog intenziteta je oko 1 dB.

Prema istraživanjima Feldkellera i Zwickera, u području zvučnih intenziteta između 30 dB i 120 dB naš sluh može razlikovati oko 235 stupnjeva glasnoće.

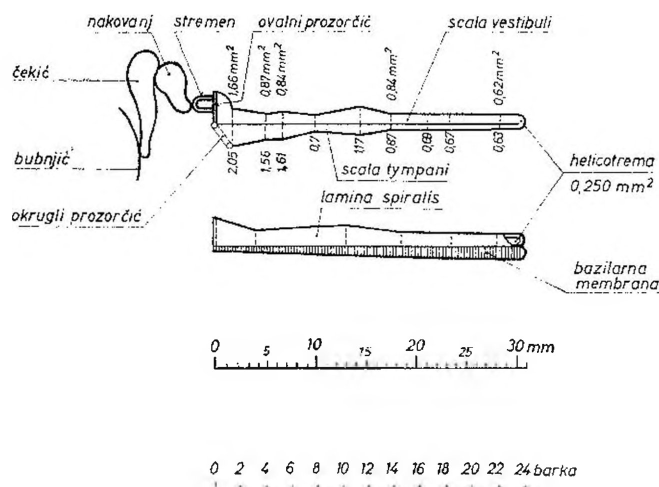
Početak psihofizike smješta se u 1829. godinu kad je fiziolog *E. H. Weber* izvijestio da dva istovrsna podražaja čovjek može razlikovati ako je među njima neka minimalna razlika. Mijenja li se npr. zvučni intenzitet, razlika u glasnoći osjetit će se tek nakon što se on promijeni za 25%. Ako je taj iznos manji, glasnoća se neće mijenjati.

Nastavljač Weberova rada *G. T. Fechner* je u deset godina izveo nebrojene pokuse dajući ispitanicima zadatak da utvrde uz koje uvjete se pojavljuje „upravo zamjetljiva razlika" između dvaju zvukova približno jednaka intenziteta, između dva svjetlosna izvora slične svjetline ili boje, između dva približno jednako teška utega. Rezultat je bila njegova knjiga *Elementi psihofizike* objavljena 1860. godine. To djelo bilo je osnova nove znanstvene discipline — *psihofizike*, kojoj je naziv dao sam Fechner. Najvažniji doprinos te knjige je u *Weber-Fechnerovu zakonu*, prema kojemu *osjet raste razmjerno logaritmu fizikalnog podražaja*. U slušnoj akustici takav zaključak izlazi iz pretpostavke da prag razlikovanja zvučnog intenziteta ne ovisi o glasnoći — da je jednak na svim

glasnoćama. Kao što je prije izneseno, ta pretpostavka nije točna jer je prag razlikovanja zvučnog intenziteta na niskim razinama glasnoće mnogo veći nego na visokima. Uz pomoć modernih mjernih sredstava, kojih Fechner u svoje doba nije imao, utvrđeno je da glasnoća raste nešto polaganije nego podražajni intenzitet (sl. 2.19.*b*). Iz već izloženoga znamo da uz tri puta viši zvučni tlak (viši za 10 dB) glasnoća poraste dva puta (broj sona je dva puta veći).

2.3.4. Izračunavanje razine glasnoće

Složeni zvuk, kao što je širokopojasni šum, sadrži komponente s frekvencijama koje zahvaćaju cijelo čujno područje. Takav zvuk potiče istodobno na titranje sve dijelove bazilarne membrane. No snaga takva zvuka ne prima se kao cjelina, nego kao 24 *frekvencijska pojasa* (sl. 2.20). Ti pojasovi ili *frekvencijske grupe* imaju do 500 Hz širinu od 100 Hz, a iznad te vrijednosti širina im je približno jednaka terci. Tonska grupa unutar svakog pojasa čini jedinicu od jednog *barka* (u čast *Barkhausena*, koji je za mjerenje razine glasnoće uveo jedinicu fon). Jednom barku pripada na bazilarnoj membrani duljina od 1,3 mm, što pomnoženo brojem barkova daje duljinu bazilarne membrane od 31 mm. Posebna je osobina frekvencijske grupe od jednog barka u tome što razina glasnoće ovisi samo o zvučnom intenzitetu, odnosno o efektivnoj vrijednosti zvučnog tlaka. Prema tome, sasvim je svejedno je li zvuk koji pobuđuje bazilarnu membranu na širini od jednog barka, uskopojasni šum s frekvencijama preko cijelog barka, ili je to jedan ton u sredini pojasa — uz jednaku efektivnu vrijednost zvučnog tlaka u oba je slučaja i razina glasnoće jednaka. Ako zvuk po svome frekvencijskom sastavu zahvaća dva ili više frekvencijskih pojasova, uz istu efektivnu vrijednost zvučnog tlaka raste razina glasnoće.



Sl. 2.20. Shematizirani presjek uha s naznačenim dimenzijama

Frekvencijski pojasovi (ili *kritične pojasne širine*) od jednog barka nemaju svoje određeno mjesto na bazilarnoj membrani. Svakih 1,3 mm njezine duljine, zahvaćenih bilo na kojem mjestu na membrani, ima već opisanu, posebnu osobinu.

Poznavati osobine sluha u vezi s frekvencijskim grupama važno je stoga da bi se razumjelo zašto se uz određene uvjete razina glasnoće koja se dobiva od više izvora može izračunati zbrajajući zvučne intenzitete. Ako n različitih zvučnih izvora djeluje istodobno, ukupni je intenzitet:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \ldots + I_n \tag{2.3}$$

Za ukupni zvučni tlak vrijedi:

$$p = \sqrt{p^2_1 + p^2_2 + p^2_3 + \ldots + p^2_n} \tag{2.4}$$

Kad n jednakih zvučnih izvora, npr. n jednakih strojeva, ili n jednakih glazbenih instrumenata, proizvodi zvuk, ukupna razina glasnoće dobiva se pomoću izraza:

$$L = 10 \log \frac{n \cdot I}{I_0} = 10 \log \frac{I}{I_0} + 10 \log n = L_1 + 10 \log n \text{ (fona)} \tag{2.5}$$

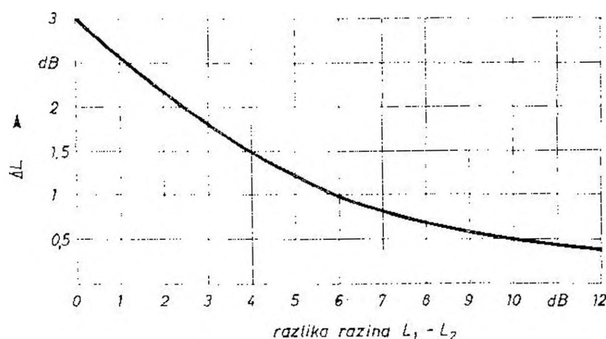
pri čemu je L_1 razina glasnoće pojedinog izvora. Uz jednake izvore smije se, naime pretpostaviti da je spektralni sastav zvuka u svih izvora praktički jednak, pa će se u svakoj pobuđenoj frekvencijskoj grupi zvučni intenziteti zbrajati.

Dva izvora jednaka zvuka dat će razinu glasnoće za $10 \log 2 = 3$ fona višu od one u pojedinog izvora. Ona će, dalje, za deset jednakih izvora biti viša od pojedinačne razine za 10 fona, a od stotine jednakih izvora za 20 fona.

Ukupna razina glasnoće različita u dvama izvorima izračunava se prema izrazu:

$$L = L_1 + \Delta L \tag{2.6}$$

Tu je L_1 razina glasnoće glasnijeg izvora, a ΔL korektivni član koji se dobiva iz dijagrama na sl. 2.21. Neka je npr. $L_1 = 90$ fona, a $L_2 = 85$ fona. Razlici $L_1 - L_2 = 5$ fona odgovara u dijagramu $\Delta L = 1{,}2$ fona. Ukupna je razina glasnoće prema tome: $L = 90 + 1{,}2 \approx 91$ fon.



Sl. 2.21. Dijagram kojim se određuje prirast glasnoće ΔL iz razlike između dviju razina buke ($L_1 \geq L_2$)

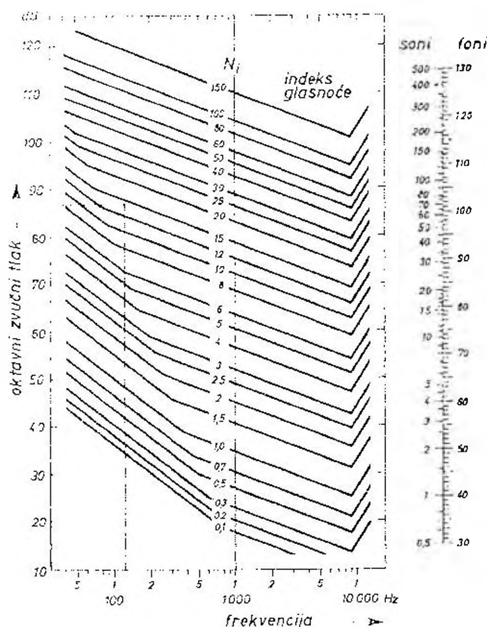
Izračunava li se razina glasnoće više od dvaju izvora, ide se postupno, polazeći od najviše vrijednosti. Neka npr. tri izvora imaju ove razine glasnoće: $L_1 = 90$ fona, $L_2 = 85$ fona i $L_3 = 88$ fona. Naći ćemo najprije L_{13}. Budući da je razlika $L_1 - L_3 = 2$ fona, iz dijagrama se dobiva $\Delta L_{13} = 2{,}2$ fona, pa je $L_{13} = 92{,}2$ fona. Budući da je $L_{13} - L_2 = 7{,}2$ fona, korektura ΔL bit će 0,7 fona. Ukupna je razina glasnoće L_{123} prema tome gotovo 93 fona.

Ako je razlika između razina dvaju izvora veća od 6 fona, može se tiši izvor većinom zanemariti jer, kao što se vidi iz dijagrama, korektura ΔL manja je od 1 fona.

Na osnovi ovih nekoliko primjera zaključit ćemo da rješava li se problem buke koju stvaraju strojevi, najveću pažnju valja obratiti „utišavanju" najbučnijega od njih. Također, treba istaknuti da se uklanjajući neke od strojeva praktički uopće neće utjecati na ukupnu buku.

U primjerima smo pretpostavili da je razina glasnoće pojedinih izvora poznata. Međutim, put do podatka o razini glasnoće nije jednostavan jer treba mjeriti i proračunavati. Prikladnih metoda ima više, no mi ćemo kao primjer izložiti *Stevensovu metodu*, kao najjednostavniju. Prvo, potrebno je mjeriti razinu zvučnog tlaka po oktavama. Dakako da je pri tome potreban instrument s ugrađenim oktavnim filtrima kojim se mjeri zvučni tlak. Polazeći od podataka o razini zvučnog tlaka u pojedinim oktavama, dobiva se iz dijagrama na sl. 2.22. *indeks glasnoće*. Taj naziv nastao je zato što su to pojasne glasnoće, pa je radi razlikovanja uvedena riječ indeks. Ukupnu glasnoću S_{uk} naći ćemo zbrojivši sve pojedinačne indekse glasnoće, prema formuli:

$$S_{uk} = S_{maks} + 0{,}3\,(\Sigma S - S_{maks}) \qquad (2.7)$$



Sl. 2.22. Dijagram za određivanje indeksa glasnoće na temelju oktavne razine zvučnog tlaka

Sa S_{maks} označen je najveći dobiveni indeks glasnoće, a sa ΣS zbroj svih indeksa glasnoće. Faktorom 0,3 uzeta je poprijeko u obzir pojasna širina i efekt maskiranja. Da bi se na osnovi broja sona dobivenih prema formuli prešlo na razinu glasnoće u fonima, upotrebljava se ljestvica soni-foni na sl. 2.22. desno od dijagrama indeksa glasnoće.

Valja napomenuti da se ovako može računati uz određene uvjete:

a) spektar zvuka (šuma ili buke) mora biti jednoličan, bez izraženih tonskih komponenata;

b) zvuk treba da je kontinuiran, pa ne smije, dakle, biti impulsan;

c) zvučno polje mora biti difuzno, što znači da postupak vrijedi za mjerenje u zatvorenoj prostoriji, podalje od izvora zvuka.

Kao primjer za primjenu Stevensonove metode uzmimo rezultate mjerenja ispušnog šuma za neki automobil:

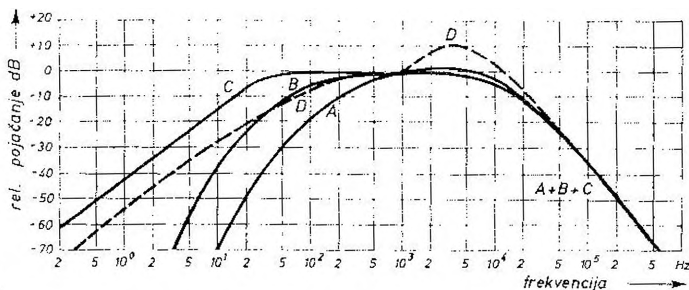
Središnja frekvencija oktave (Hz)	31,5	63	125	250	500	1 000	2 000
Pojasna razina zvučnog tlaka (dB):	84	90	87	71,5	63	61	54
Indeks glasnoće:	5,7	13,7	14,4	6,8	4,9	5,2	4,1

$$S_{uk} = 14{,}4 + 0{,}3 \cdot 40{,}4 = 26{,}52 \text{ sona.}$$

Na ljestvici soni—foni može se otčitati da glasnoći od 26,52 sona odgovara razina glasnoće od 87,5 fona.

2.3.5. Mjerenje razine glasnoće

Mjeri li se razina glasnoće usporednim slušanjem, nedostatak je u tome što rezultat ovisi o subjektivnoj ocjeni pa je radi veće sigurnosti potrebno da u mjerenju sudjeluje više osoba. Objektivni mjerač razine glasnoće ili *zvukomjer* (sl. 2.23) sastoji se od mikrofona, pojačala, filtara i pokaznog instrumenta. Frekvencijske karakteristike koje se dobivaju pomoću filtara imaju oznake A, B i C (sl. 2.24). Prema prvotnoj svojoj namjeni te karakteristike bile su približne frekvencijske karakteristike glasnoće što ih ima uho pri različitim zvučnim tlakovima (vidi



Sl. 2.24. Filtarske karakteristike zvukomjera



Sl. 2.23. Minijaturni zvukomjer (Brüel & Kjaer)

sl. 2.18.*b*). Pokazalo se, međutim, da mjerenje uz upotrebu karakteristike *A* daje rezultate koji se vrlo često slažu sa subjektivnom ocjenom razine glasnoće šuma ili buke. Katkad se preporučuje upotreba svih triju karakteristika, dakle tri mjerenja. Tako se može otkriti frekvencijska raspodjela mjerenog zvuka. Ako je npr. u sva tri mjerenja rezultat približno jednak, onda to znači da prevladavaju frekvencije više od 600 Hz. Uz rezultat koji je na položaju *C* viši od onoga na položaju *A* i *B*, može se zaključiti da šum ili buka imaju jake komponente u području nižemu od 600 Hz.

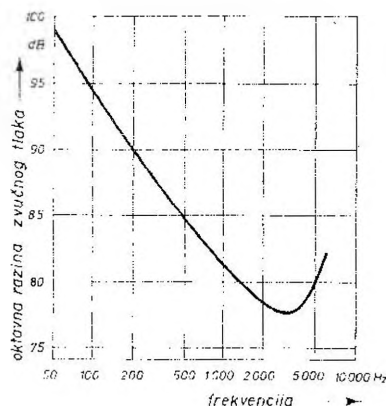
U novije doba filtarskim je karakteristikama *A*, *B* i *C* dodana još i karakteristika *D* kojom se jače ističe područje visokih frekvencija, između 1,5 i 10 kHz. Te frekvencije čovjeku više smetaju, pa im i pri mjerenju valja dati veću važnost.

Mjereći razinu glasnoće zvukomjerom katkad se dobivaju rezultati vrlo različiti od onih koje daje usporedno slušanje. Razlike mogu iznositi čak do 20 fona. To je razlog da zvukomjer nema skalu u fonima, nego u *decibelima*. No uza sve to on se vrlo mnogo upotrebljava jer omogućuje da se rezultati uspoređuju.

Prvi aparat za tehničko mjerenje razine glasnoće konstruirao je 1926. godine *H. Barkhausen*. Postupak se temeljio na usporedbi mjerenog zvuka s onim što ga je proizvodilo zujalo, a primao se preko slušalice. Regulatorom s podjeljcima od po 5 fona i opsegom od 0 do 100 fona ugađala se glasnoća tona koji se proizvodio u aparatu. H. Barkhausen je prvi za zvučni tlak upotrijebio logaritamsku skalu. On je, također, uveo jedinicu fon.

2.3.6. Štetna i opasna buka

Općenito, *buka je nepoželjan zvuk*. Uz razinu glasnoće manju od 70 fona ona smeta čovjeku ovisno o njegovu raspoloženju. Osim razine glasnoće važne su i druge osobine buke, kao frekvencijski sastav, ritam i trajanje. I uz nisku razinu glasnoće trajna buka izaziva neuroze i ometa intelektualni rad. Zanimljivo je da buka čovjeku mnogo više smeta ako je proizvodi netko drugi nego kad je, sasvim jednake glasnoće, izaziva on sam. Zatim, buka koja se periodično mijenja više smeta nego kad je trajna. Na razinu glasnoće buke između 70 i 90 fona tijelo reagira neovisno o čovjekovoj volji. To se očituje u vegetativnim smetnjama i poremećajima u krvotoku. Pri trajnoj buci koja premašuje 90 fona nastaju organsko-anatomska oštećenja slušnog organa. Također se remeti osjet ravnoteže, pojavljuje se šum u ušima, nesanica i mučnina. Dijagram na sl. 2.25. prikazuje gornju granicu razine glasnoće (prema *Slavinu*) koju smiju imati oktavni pojasovi trajne buke pa da se oštećenje sluha ne pojavi kod više od 5% zaposlenih u takvim pogonima.



Sl. 2.25. Najveća dopuštena oktavna razina trajne buke (prema Slavinu). U svim oktavama razina buke mora biti ispod krivulje.

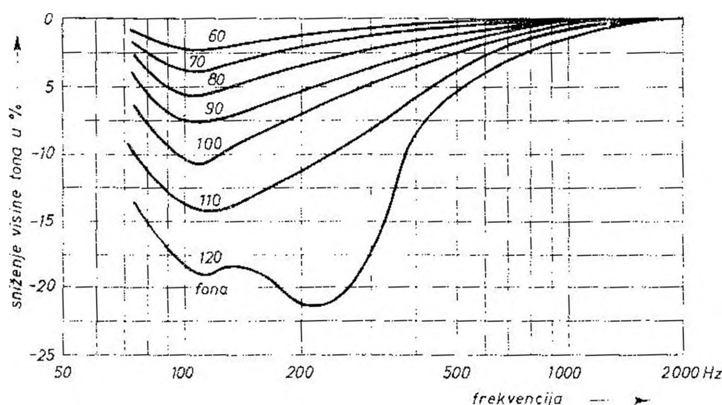
2.3.7. Visina tona

U muzici interval je stanovita razlika u tonskoj visini. Najvažniji interval je *oktava.* Dva tona koji se razlikuju za oktavu imaju veliku prirodnu sličnost i muzičari ih označuju istim slovima, a razlika je u indeksima. Interval se na svim visinama tona osjeća kao jednaka razlika. S fizikalnog gledišta interval nije stanovita razlika u frekvencijama, nego određeni *odnos frekvencija.* Kod oktave taj odnos je 2 : 1, kod kvinte 3 : 2 itd. Zajednička osobina logaritma frekvencija sa subjektivnom visinom tona je u tome što povisi li se ton za isti interval, on jednako poraste neovisno o apsolutnom iznosu frekvencija:

$$\log \frac{f_1}{f_2} = \log f_1 - \log f_2 \tag{2.8}$$

Logaritamska je skala frekvencija, prema tome, *upravo onakva kakva odgovara svojstvu uha u vezi s osjetom visine tona.*

Jedan kontinuirani ton može se od drugoga kontinuiranog tona razlikovati po *glasnoći, visini* i *boji.* Visina je u prvom redu određena frekvencijom. Međutim, na subjektivni osjet visine tona djeluje i njegova glasnoća. Ako se npr. nekome sinusoidnom tonu niske frekvencije poveća glasnoća, dobiva se osjet nižeg tona, kao da je frekvencija postala niža. Iz dijagrama na sl. 2.26. može se otčitati da ton frekvencije od 100 Hz, ako mu se glasnoća poveća sa 40 na 100 fona, zvuči kao ton kojemu je frekvencija 10% niža, dakle kao ton frekvencije od 90 Hz. Kao što se iz dijagrama može vidjeti, subjektivno sniženje visine tona događa se samo na većim glasnoćama, u području nižemu od 1 000 Hz. Između 1 000 i 5000 Hz visina čistog tona praktički je neovisna o glasnoći. Na visokim frekvencijama uz porast glasnoće raste i visina tona.

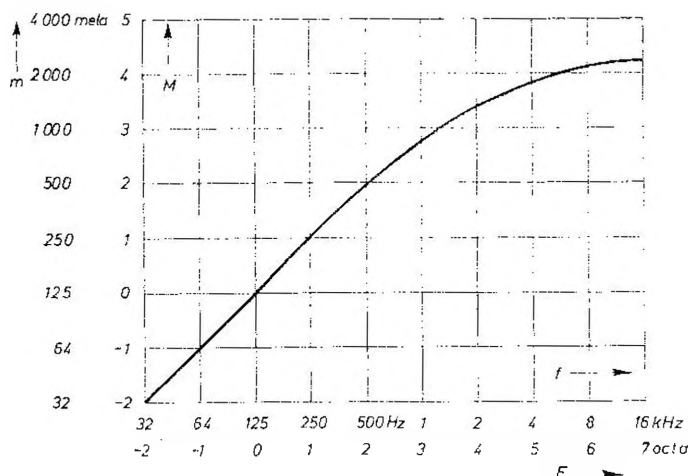


Sl. 2.26. Frekvencijska ovisnost promjene subjektivne visine tona o razini glasnoće

Visina tona znatno se mijenja, kako to izlazi iz dijagrama na sl. 2.26, samo kod čistih tonova. Slušajući glazbene tonove, kao violine, klarineta, trube itd., ne osjećamo s porastom glasnoće promjenu tonske visine. Razlog je u spektralnom sastavu takvih tonova jer oni osim osnovnog tona sadržavaju i harmonike velikih

amplituda, katkad većih od amplitude osnovnog tona. Ako se osnovni ton zbog povećane glasnoće snizi, harmonicima visina ostaje stalna ili se vrlo malo mijenja, tako da promjena visine osnovnog tona praktički ne utječe na visinu kompleksnog tona.

Slušajući neki ton možemo lako ugoditi drugi za oktavu viši ili za oktavu niži od prvoga. Ugađanje je drukčije ako se tonovi ne slušaju istodobno (ili neposredno jedan poslije drugoga), nego se polazi od zapamćene visine prvog tona. Na primjer, nekoliko sekunda sluša se ton frekvencije od 3 kHz. Ako se nakon toga ugađa ton upola niže visine, bit će mu frekvencija oko 1 kHz, a ne 1,5 kHz, kao što bi se ugodilo kad bi se oba tona slušala istodobno. No takav drukčiji omjer frekvencija dobiven na osnovi ugađanja polovične visine tona prema zapamćenom tonu vrijedi za frekvencije više od 500 Hz ili, praktički, iznad 1000 Hz. Niže od tih frekvencija ugođena polovična visina tona odgovara polovici frekvencije. Što se više pomičemo prema najvišim frekvencijama čujnog područja, to je sve veći spomenuti nerazmjer.



Sl. 2.27. Ovisnost tonske vrijednosti nekog tona o frekvenciji

Iz ovog izlaganja uočava se da razlikujemo dvije tonske visine: *harmonijsku* i *melodijsku*. Između dva harmonijski jednaka intervala (kao što je terca, kvarta, kvinta itd.) na niskim tonskim položajima (ispod 500 Hz) melodijska je razlika veća nego na višima. Jedinica za osjetnu veličinu *tonske vrijednosti* ima naziv *mel* (prema riječi *melodija*). Kakva je ovisnost tonske vrijednosti o frekvenciji, prikazije dijagram na sl. 2.27. Tu su na apscisu nanesene harmonijske oktave, a na ordinatu melodijske oktave. Ako frekvencija raste logaritamski: 125, 250, 500, 1000, 2000 Hz itd, onda je između svake dvije susjedne frekvencije muzički interval jednak tj. iznosi oktavu, pa harmonijska visina tona raste linearno. To vrijedi i za melodijsku visinu tona ako tonska vrijednost raste logaritamski, dakle: 125, 250, 500, 1000 mela itd. No za melodijske oktave nije omjer frekvencija iznad 500 Hz 1 : 2, već je drukčiji. Iz dijagrama se može otčitati da je slijed frekvencija

ovakav: 125, 250, 500, 1 200 Hz, 6 400 Hz. Čujno područje između 16 Hz i 16 kHz obuhvaća više od deset harmonijskih oktava. Na istom frekvencijskom području smješteno je 6,3 melodijskih oktava.

Od davnine su se izgrađivali glazbeni instrumenti, a da pri tome nije bio poznat odnos između frekvencije i visine tona. Prvi je na to pitanje dao odgovor *Robert Hooke*. On je 1681. godine napravio uređaj s nazubljenim kotačem i komadićem ljepenke. Kad je okretao kotač, zupci su strugali po ljepenci pa se čuo glazbeni ton. Znajući brzinu okretanja i broj zubaca, mogao je Hooke izračunati frekvenciju proizvedenog tona. Tim pokusom on je utvrdio da je tonska visina praktički razmjerna frekvenciji.

Da bi ustanovili kakav je odnos između frekvencije i visine tona, znanstvenici su Harvardskog sveučilišta 1937. godine izveli pokus s električkim klavirom koji je imao dvadeset tipaka. Iznad svake tipke bilo je dugme za regulaciju frekvencije. Zadatak je bio da ispitanici pomoću dugmeta ugode klavir, ali tako da između tonova na tonskoj ljestvici budu jednaki razmaci. Rezultat mjerenja frekvencije bio je iznenađujući. Pokazalo se da u području iznad 1 000 Hz jednakim omjerima između frekvencija ne odgovaraju jednaki tonski razmaci. Tom je prilikom za tako dobivenu tonsku visinu uvedena jedinica mel.

Zwicker i *Feldkeller* izvještavaju o svom pokusu. Ispitanicima je predloženo da nekoliko sekunda slušaju uskopojasni šum sa središnjom frekvencijom od 8 kHz i širinom pojasa od 250 Hz. Takav šum ima sasvim izraženu tonsku visinu. Zatim, nakon što su slušali tonove od 500 Hz i 3 kHz, ispitanici su upitani jesu li ti tonovi niži ili viši od polovične tonske visine šuma od 8 kHz. Odgovor je bio da je ton frekvencije od 500 Hz niži, a onoj od 3 kHz viši od polovične tonske visine šuma. Pošto se postupno podizala niža frekvencija i spuštala ona viša, ispitanici se se složili u tvrdnji da je polovična visina tona osmokilohercnoga uskopojasnog šuma između 1,3 i 1,4 kHz. Pokusi provedeni i s uskopojasnim šumom na drugim frekvencijama dali su rezultate prikazane dijagramom na sl. 2.27.

Osobina sluha u vezi s melodijskom visinom tona može se provjeriti i na klaviru. Na primjer, velike terce c_0 — e_0 i a_3 — cis_4 ne osjećaju se kao jednako široki intervali; visoka terca je melodijski uža. Pokusom se može pokazati da terci c_0 — e_0 po intervalu približno odgovara kvinta a_3 — e_4.

Analogno razini zvučna tlaka uveden je za ljestvicu harmonijskih tonskih visina u oktavama pojam *razine frekvencije F*. Kao referentna frekvencija odabrana je ona od 125 Hz. Jedinica za frekvencijsku razinu nazvana je *okta*, prema riječi oktava. Dok se pod oktavom razumijeva interval između bilo kojih dviju frekvencija koje se odnose kao 1 : 2 (ili 2 : 1), u oktama izražena frekvencija apsolutna je mjera za tonsku visinu. Oktavna skala ispod apscise dijagrama na sl. 2.27. označena je u oktama.

Napomenimo još i to da razlika između harmonijske i melodijske visine tona nema veće praktičko značenje jer su u glazbi osnovni tonovi s frekvencijama višima od 1 000 Hz vrlo rijetki.

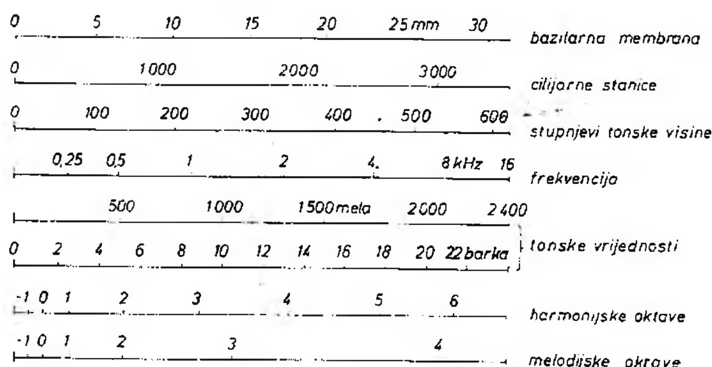
Subjektivna visina kompleksnog tona koji čine npr. frekvencije od 100, 200, 300, 400 i 500 Hz, gdje su sve komponente jednake glasnoće, iznosi približno 100 mela. Ako se komponenta od 100 Hz ukloni, visina tona ostaje ista. Tome je uzrok nelinearnost uha, o čemu će još biti riječi.

Kad je broj komponenata kompleksnog zvuka velik, a one su po frekvenciji vrlo blize, izgubi se visina tona i dobiva se šum. Tipičan primjer šuma je *toplinski šum*, kojeg su sve komponente približno jednakog intenziteta, raspoređene po cijelome čujnom području.* Analogno nazivu „bijelo svjetlo" naziva se takav šum bijelim šumom.

Zanimljivi su rezultati ispitivanja kojima je bio cilj da se utvrdi gdje su na bazilarnoj membrani pobudne točke pri različitim frekvencijama. Pokazalo se da

* U svakome električkom vodiču nastaje zbog termičkog djelovanja nepravilno gibanje slobodnih elektrona. Ako se napon koji se na krajevima vodiča pojavljuje kao posljedica tog gibanja jako pojača i privede zvučniku, čuje se šum, *toplinski šum*.

jednakim pojasovima u melima odgovara jednaka duljina odsječaka na bazilarnoj membrani. Tako razmaku od 1 mm odgovara približno 100 mela, što je jednako 1 barku. Tonska vrijednost ima, prema tome, po duljini bazilarne mebrane linearnu skalu (sl. 2.28).



Sl. 2.28. Prirodne skale bazilarne membrane

Neki ljudi u osjetu tonske visine nemaju simetričan sluh. Slušajući ton neke frekvencije oni jednim uhom čuju drukčiju visinu nego drugim. Takav se slušni nedostatak naziva *dvostruko slušanje* ili *diplacusis*.

2.3.8. Prag razlikovanja frekvencije

Promjena frekvencije rezultira promjenom tonske visine. No uho ne može osjetiti bilo kako malenu promjenu frekvencije. Brojna su ispitivanja pokazala da to ovisi o zvučnom intenzitetu i frekvenciji, ali i o mjernoj metodi. Ako se npr. frekvencija naglo promijeni, čuje se „knak", pa takvo ispitivanje ne daje ispravne rezultate. Najveću praktičku vrijednost ima postupak pomoću sinusoidnog moduliranja frekvencije. Kao i pri promjeni zvučnog intenziteta tako je i za frekvenciju ustanovljeno da je sluh najosjetljiviji na modulacijskoj frekvenciji od 4 Hz. Na srednjim razinama glasnoće (oko 70 fona) i na frekvencijama višima od 500 Hz prag razlikovanja frekvencije pojavljuje se uz frekvencijsku devijaciju od 3‰. Niže od 500 Hz zamjetljiva frekvencijska devijacija iznosi 1,5 Hz, pa je ukupna frekvencijska promjena 3 Hz.

Prema Zwickerovim mjerenjima i proračunima naš sluh može razlikovati 850 stupnjeva tonskih visina.

2.3.9. Treptaji i subjektivni tonovi

Dva čista tona približno jednake glasnoće koji se po frekvenciji razlikuju za nekoliko herca čuju se kao jedan ton kojemu se glasnoća kontinuirano i ritmički mijenja. Kažemo da uho čuje *treptaje*, a njihova frekvencija jednaka je razlici frek-

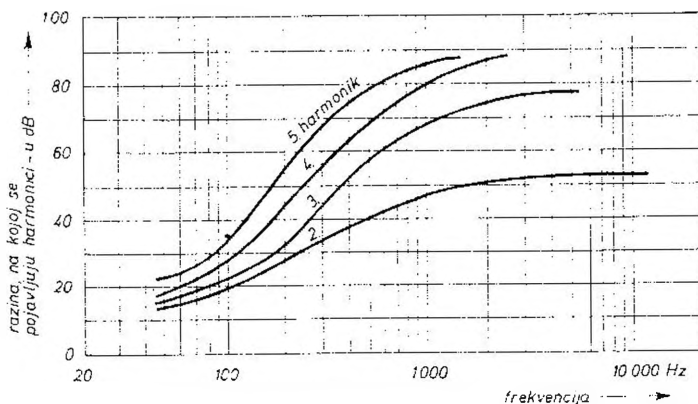
vencija tonova. Ako se zbog promjene frekvencije jednog od tonova broj treptaja poveća na više od 6 do 7 u sekundi, glasnoća se ne koleba kontinuirano, već intermitentno. Uz još veću razliku u frekvenciji tonova postaje zvuk tvrd i disonantan.

Ako razlika frekvencija dvaju tonova pada u čujno područje i ako je glasnoća dosta velika, može se čuti i treći ton, kojemu je frekvencija jednaka razlici frekvencija primarnih tonova. Toj pojavi uzrok je *nelinearna karakteristika uha*. Iz teorije o električkim krugovima poznato je da privode li se dvije frekvencije nelinearnom elementu, nastat će još i frekvencije koje su jednake *razlici* i *zbroju* tih primarnih. Uho je također nelinearan element pa se stoga i u njemu pojavljuju frekvencije razlike i zbroja, nazvane *kombiniranim tonovima*.

U pjevanju ženskih zborova česte su visokofrekvencijske komponente velike glasnoće koje u uhu proizvode neželjene tonove razlike.

Od kombiniranih tonova nastalih zbog nelinearnosti sluha posebno je upadljiv ton razlike prvog reda. Na njega je prvi upozorio orguljaš *G. Sorge*, još 1740. godine, a poslije toga i violinist *G. Tartini*.

U uhu, međutim, nastaju nove frekvencije i onda kad ono prima samo jedan čisti ton. Uzrok je jednak kao i kod kombiniranih tonova: nelinearnost karakteristike uha. Ako se sluša npr. ton frekvencije od 200 Hz, onda će se uz dovoljno veliku glasnoću tog tona pojaviti i frekvencije od 400, 600, 800 Hz itd. Postojanje tih *auralnih harmonika* možemo lako otkriti tako da se uhu privede vanjski ton npr. frekvencije od 603 Hz. Ta frekvencija dat će s trećim harmonikom od 200 Hz, tj. sa 600 Hz, treptaje koji se lako osjete. Budući da su oni najjači kad su amplitude komponenata jednake, pomoću treptaja može se odrediti i subjektivna glasnoća pojedinoga auralnog harmonika.



Sl. 2.29. Ovisnost pojavljivanja subjektivnih harmonika o razini zvučnog intenziteta iznad praga čujnosti i o frekvenciji

Iz dijagrama na sl. 2.29. vidi se uz koju se razinu iznad praga čujnosti pojavljuje pojedini harmonik na nekoj frekvenciji osnovnog tona. Na primjer, kod tona frekvencije od 100 Hz pojavit će se drugi harmonik uz zvučni tlak za 20 dB viši od onoga na pragu čujnosti. Uz malo viši zvučni tlak dobit će se treći harmonik, a poslije toga četvrti i peti. Glasnoća drugog harmonika manja je od one u

osnovnog tona, a svaki slijedeći harmonik manje je glasnoće nego prethodni. To pravilo, međutim, ne vrijedi za posve niske frekvencije. Na primjer, kod tona od 50 Hz pri glasnoći od 100 fona drugi je harmonik glasniji od osnovnog tona, a i neki mu se viši harmonici u tome približavaju.

Kombinirani tonovi ne nastaju samo iz zbroja i razlike dvaju osnovnih tonova nego i kombinacijom njihovih harmonika. Tako dva tona frekvencije od 700 i 1 200 Hz mogu osim svojih harmonika dati ove kombinirane tonove: 700 + 1 200 = = 1 900 Hz, 1 200 — 700 = 500 Hz, 2 × 700 = 1 400 Hz, 2 × 1 200 = 2 400 Hz, (2 × 700) + 1 200 = 2 600 Hz, (2 × 1 200) + 700 = 3 100 Hz, (2 × 700) — — 1 200 = 200 Hz, (2 × 1 200) — 700 = 1 700 Hz itd. Na osnovi toga razumijemo zašto niz frekvencija od 100, 200, 300, 400 i 500 Hz, kao što smo napomenuli u prošlom odjeljku, daje subjektivnu visinu tona od oko 100 mela i onda kad se ukloni frekvencija od 100 Hz. Ostale se frekvencije razlikuju za 100 Hz pa u uhu nastane ton razlike koji odredi visinu tona.

Ton razlike frekvencija može se čuti npr. ako se jako puhne u sportsku sudačku zviždaljku. Pored dvaju visokih tonova koje proizvodi zviždaljka čuje se i niski ton što nastaje u uhu.

Sumarni ton ($f_1 + f_2$) — nasuprot tonu razlike ($f_1 - f_2$) — ne može se uvijek čuti jer je obično mnogo tiši. Tome je razlog niskopropusni karakter prijenosnog sustava srednjeg uha zbog čega su prigušene frekvencije iznad 1 000 Hz.

Osnovni ton koji se čuje iako ga objektivno nema u složenom zvuku, naziva se *rezidualni ton* ili *reziduum*.

Gudački instrumenti imaju male dimenzije prema valnoj duljini svojih najnižih tonova, pa su zbog toga amplitude tih tonova relativno vrlo malene. No uza sve to tonsku visinu određuje osnovna komponenta. Može se sasvim ukloniti ne samo osnovni ton nego i nekoliko nižih harmonika, pa da visina glazbenog tona ostane ista. Tome je uzrok pojava reziduuma.

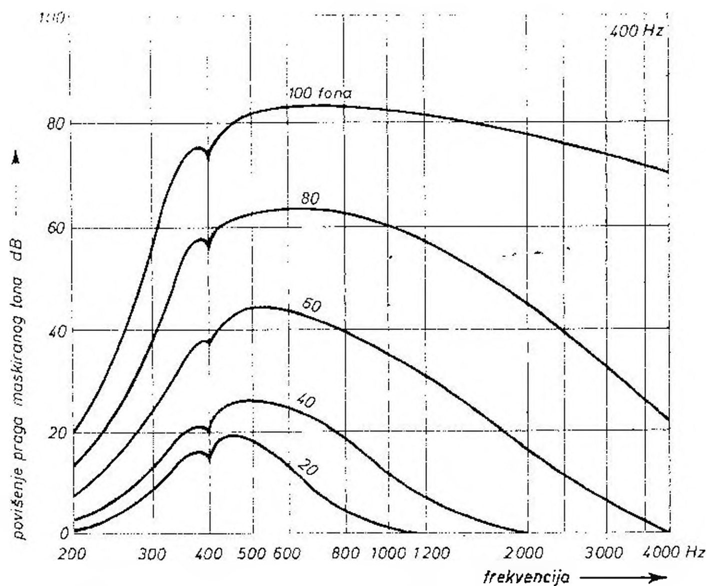
Evo još jednog primjera iz svakodnevna života. Preko telefona se praktički ne prenose frekvencije niže od 300 Hz. Iako su u tom frekvencijskom području osnovne komponente muških glasova, a katkad i ženskih, glasovna se visina govornika ne mijenja.

Na pitanje gdje je uzrok nelinearnosti uha znanost još nije dala pouzdan odgovor. Utvrđeno je da izobličenje dijelom nastaje u srednjem uhu. Izgleda, međutim, da u tome glavnu ulogu ima unutrašnje uho, i to u vezi s nelinearnošću u cilijarnim stanicama.

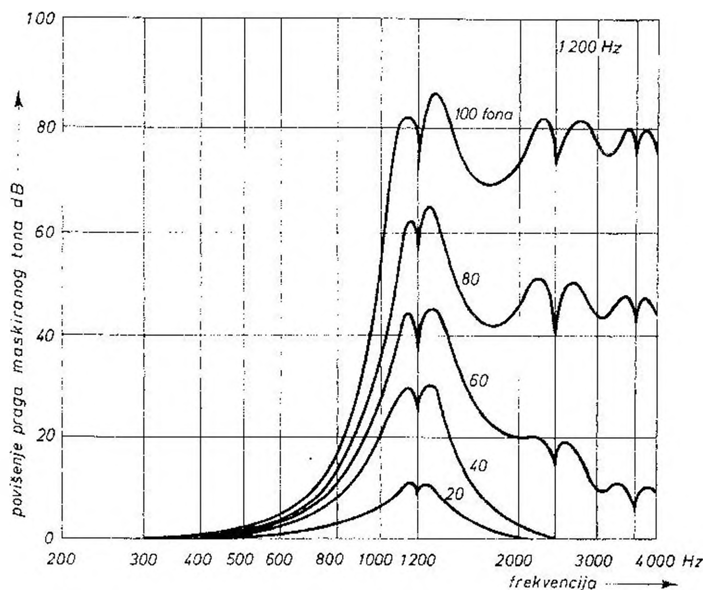
2.3.10. Maskiranje ili prekrivanje zvukova

Općenito je poznato da u bučnim prostorijama nije moguć razgovor normalne glasnoće. Buka ga *prekrije* ili *maskira* pa se pojedine riječi ne mogu čuti. Tek kad se glasnoća povisi, kad se buka nadglasa, govor postaje razumljiv.

Laboratorijskim je ispitivanjima utvrđeno kako se međusobno maskiraju čisti tonovi. Dijagramima na sl. 2.30. i 2.31. prikazano je kako ton od 400 Hz na prvoj i od 1 200 Hz na drugoj maskira ostale tonove akustičkog spektra. Broj fona uz pojedinu krivulju naznačuje glasnoću tona od 400 Hz i onoga od 1 200 Hz. Vrijednost krivulje na pojedinim frekvencijama spektra označuje za koliko decibela treba povisiti razinu na toj frekvenciji iznad praga čujnosti, pa da se ton upravo zamijeti. Na primjer, ako je ton od 400 Hz na razini od 80 fona, onda se prag čujnosti tona od 1 000 Hz, koji se sluša istodobno, povisi za 60 dB.

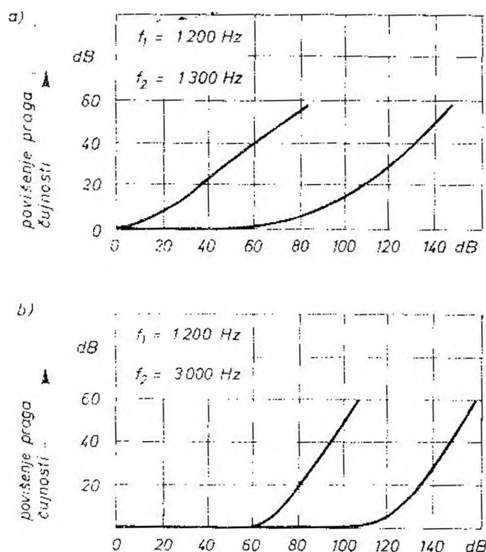


Sl. 2.30. Frekvencijska ovisnost povišenog praga čujnosti uz ton frekvencije od 400 Hz na različitim razinama glasnoće



Sl. 2.31. Frekvencijska ovisnost povišenog praga čujnosti uz ton frekvencije od 1200 Hz na različitim razinama glasnoće

Iz krivulja se vidi da je efekt maskiranja jači za frekvencije koje su bliže (krivulja se uzdiže). Na posve blizim frekvencijama nastaju treptaji, zbog čega se prisutnost druge frekvencije otkriva već pri niskim intenzitetima, što se vidi iz krivuljina oštrog pada. Treptaji i oštar pad krivulje pojavljuju se i na harmonicima osnovne frekvencije (u sl. 2.31. na 2400 Hz i na 3600 Hz). Te pojave nastaju i uz ton od 400 Hz, samo su manje izražene, pa u dijagramu na sl. 2.30. nisu ucrtane.



Sl. 2.32. Pomak praga čujnosti uz binauralno maskiranje. Lijeva karakteristika prikazuje rast praga uz privođenje obiju frekvencija istom uhu, a desna uz privođenje jedne frekvencije jednome, a druge frekvencije drugom uhu

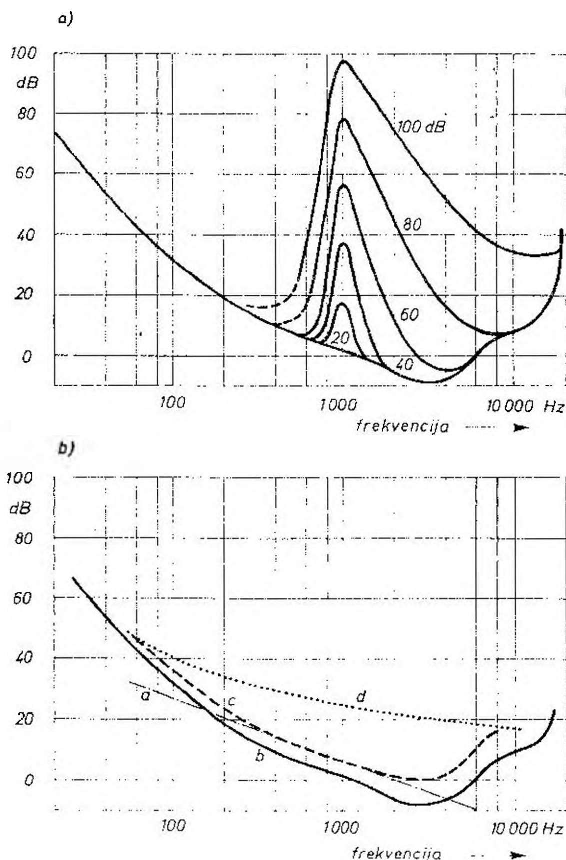
Predočeni dijagrami vrijede uz uvjet da se oba tona primaju jednim uhom. Drukčije će biti ako se jedan ton dovodi jednome, a drugi drugom uhu. Rezultati takvih ispitivanja vide se na sl. 2.32. Lijeve krivulje odnose se na maskiranje u jednom uhu, a desne prikazuju *binauralno maskiranje*. Na sl. 2.32.*a* zapaža se da uz ton od 1200 Hz pri glasnoći od 60 fona treba intenzitet tona od 1300 Hz povisiti za 40 dB, pa da se taj drugi ton počne u istom uhu čuti. Na tom istom intenzitetu prvog tona tek se počinje zamjećivati maskiranje drugog tona privedenoga drugom uhu (desna krivulja pri tom intenzitetu upravo počinje). Te krivulje u dijagramima pomaknute su udesno od lijevih krivulja za oko 50 dB. To je iznos koji je vezan za koštanu vodljivost između jednog i drugog uha. Drugim riječima, maskiranje počinje tek onda kad ton prijeđe od jednog uha u drugo preko kostiju glave.

Činjenica da kosti prenose zvuk ima veliko značenje pri slušanju vlastitog glasa. Otpor koji zvuku pružaju kosti lubanje na različitim je frekvencijama različit. Zbog toga dio govora što do uha stiže preko kostiju glave zvuči drukčije nego onaj koji se prenosi zrakom. To je razlog da svoj glas snimljen i reproduciran preko magnetofona jedva možemo prepoznati kad ga prvi put čujemo.

Maskiranje uskopojasnim šumom daje dijagram sličan onome s čistim tonom. Dijagram na sl. 2.33*a* predočuje takvo maskiranje uz središnju frekvenciju od 1 kHz i pojasnu širinu od 160 Hz. Prema niskim frekvencijama krivulje se strmo

spuštaju. U području iznad maksimuma razmak između krivulja raste prema višim frekvencijama, i to izrazitije što je razina šuma viša.

Posebno je zanimljiv efekt maskiranja što ga uzrokuje zvuk kontinuiranog spektra, kao što je širokopojasni šum. Na sl. 2.33.*b* prikazan je frekvencijski spektar šuma u sobi za stanovanje. Zbog tog se šuma ili buke, kao što je predočeno gornjom krivuljom na istoj slici, podiže prag čujnosti na višu razinu.



Sl. 2.33. a) Podizanje praga čujnosti uz maskiranje šumom pojasne širine od 160 Hz sa središnjom frekvencijom na 1000 Hz. Parametar je razina zvučnog tlaka šuma. b) Karakteristika (a) spektar je šuma u prosječnoj sobi, karakteristika (b) prag je čujnosti što ga ima 1% ljudi, a karakteristika (c) 5% ljudi, i (d) je karakteristika praga čujnosti uz šum sobe sa spektrom (a).

Šum kojemu razina ne premašuje prag čujnosti nagluha čovjeka ne smeta toj osobi pri slušanju. Ako je razina glasnoće šuma npr. 50 fona, a prag čujnosti nagluhe osobe podignut je prema normalnom pragu za 50 dB, onda se ona u pogledu razumljivosti govora donekle izjednačuje s osobom normalna sluha. Kako se u buci govori glasnije, dobiva se utisak da nagluha osoba čuje bolje u buci nego kad je tišina.

Efekt maskiranja može znatno promijeniti kvalitetu glazbenog tona jer šum ili buka prekrije tiše tonove ili tiše komponente kompleksnog tona. Stoga je pri visokokvalitetnoj reprodukciji glazbe potrebno što više smanjiti buku. Kompozitori moraju paziti i na efekt maskiranja jer jaki basovi prekriju tiše visoke tonove.

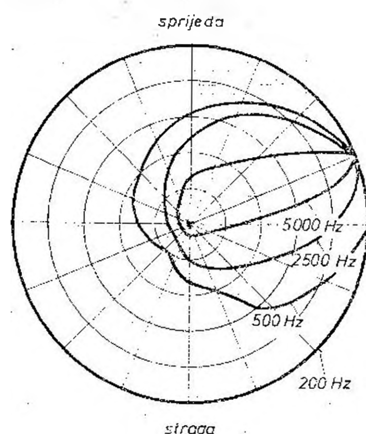
Općenit zaključak koji se može izvesti iz opisanih dijagrama jest taj da *glasni duboki tonovi prekrivaju tihe visoke tonove i čine ih nečujnima.* To je razlog zašto u mješovitim pjevačkim zborovima ima manje muških glasova nego ženskih, a isto je tako u gudačkim orkestrima broj čela znatno manji nego violina.

Pojava maskiranja na poseban način dolazi do izražaja u elektroničkoj reprodukciji glazbe. Visoki tonovi koji se pri normalnoj glasnoći čuju postaju nečujni ako se okrećući regulator povisi glasnoća. Prema tome pogrešna glasnoća reprodukcije promijeni glazbu ne samo *kvantitativno* nego i *kvalitativno*.

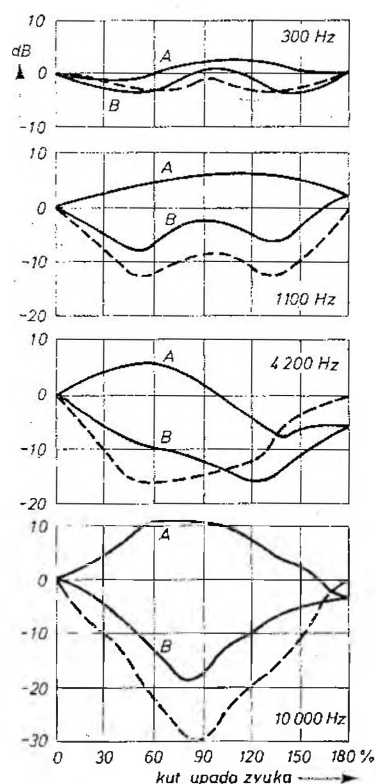
2.3.11. Binauralno lokaliziranje

Sluhom čovjek može s relativno velikom točnošću odrediti smjer i udaljenost zvučnog izvora. Tom *binauralnom lokaliziranju* podloga su tri činioca:

1. *razlika u glasnoći* zbog zasjenjivanja glave i ušnih školjki;
2. *razlika u fazi* pri kontinuiranom tonu jer jedno uho prima neki ton s drukčijom fazom nego drugo;
3. *vremenska razlika* pri impulsnim zvučnim procesima jer zbog razlike u duljini puta impuls općenito ne stiže do oba uha u isto vrijeme.



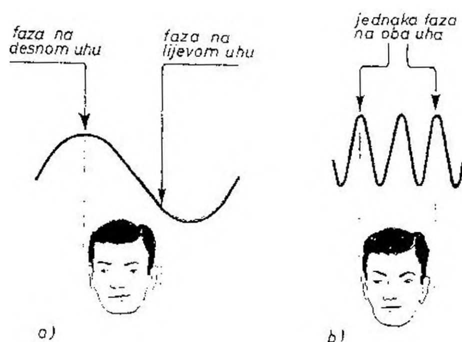
Sl. 2.34. Usmjerne karakteristike desnog uha na raznim frekvencijama



Sl. 2.35. Promjene i razlike intenziteta zvuka u bližem (A) i udaljenijem (B) uhu kad izvor zvuka rotira u horizontalnoj ravnini oko glave. Crtkana karakteristika izražava razliku između A i B.

Na sl. 2.34. prikazane su u polarnom dijagramu usmjerne karakteristike uha za neke frekvencije. Na posve niskim frekvencijama valne su duljine mnogo veće od dimenzija glave, tako da ona nije zapreka širenju valova pa usmjernog djelovanja nema. Što je frekvencija viša, ono će, međutim, biti izrazitije. Razlika u intenzitetu između lijevog i desnog uha odlučno utječe na frekvencijama iznad 300 Hz pri lokaliziranju. Intenzitet što ga prima uho okrenuto izvoru zvuka (*A*) i onaj u drugom uhu (*B*) prikazani su ovisno o kutu upada zvuka u dijagramima na sl. 2.35. Crtkana krivulja daje tu razliku u decibelima.

Fazna razlika među zvukovima što ih prima pojedino uho nije samo funkcija razmaka između ušiju (koji iznosi oko 20 cm) i položaja glave prema izvoru zvuka već i frekvencije. Na posve niskim frekvencijama zbog velike valne duljine fazna je razlika malena, pa se lokaliziranje na osnovi faznih odnosa ne može postići. Pouzdano lokaliziranje na temelju fazne razlike dobiva se u području između 200 i 800 Hz. Na višim frekvencijama fazna je razlika veća od 180° i sigurno lokaliziranje na osnovi fazne razlike nije moguće (sl. 2.36).



Sl. 23.6. a) Razlika u fazi zvučnog vala za pojedino uho u području srednjih frekvencija. b) Na visokim frekvencijama može se u oba uha pojaviti jednaka faza.

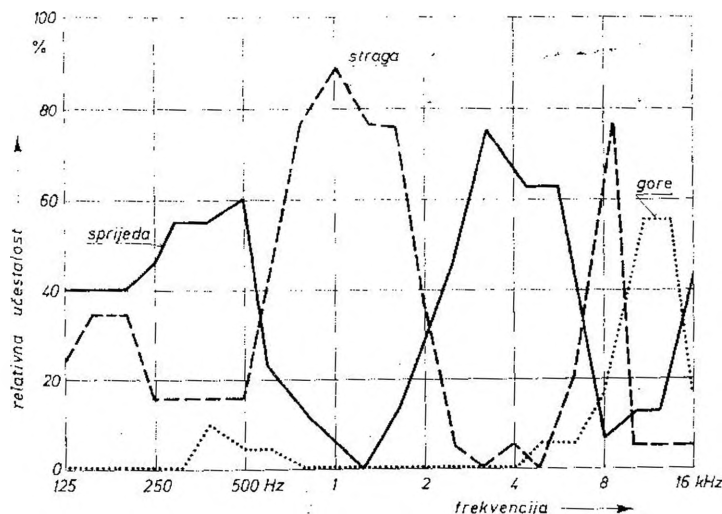
Smjer izvora zvuka lakše je odrediti uz kompleksan zvuk nego uz čisti ton Kad, naime, zvuk ima komponente po cijelome akustičkom području nastaje. kombinirano lokaliziranje, i to na višim frekvencijama na temelju razlike glasnoće, a na nižima zbog fazne razlike, pa je stoga lokaliziranje uspješnije. Kad želimo ustanoviti smjer izvora, okrećemo glavu amo-tamo, primjenjujući time u elektrotehnici poznatu *nul-metodu* koja daje točniji rezultat nego određuje li se smjer iz razlike u glasnoći i fazi*.

Ako je izvor u ravnini simetrije glave (u medijalnoj ravnini), oba uha dobivaju sasvim jednake signale. Stoga je dugo bio problem kako čovjek može odrediti kad je izvor u medijalnoj ravnini sprijeda, a kada straga ili gore. Slušna se razlika u tim smjerovima (i u međusmjerovima) pojavljuje zbog difrakcije zvučnih valova oko glave i ušnih školjki. Ona ima filtarsko djelovanje, pa stoga frekvencijska karakteristika širokopojasnog spektra dobiva izdizanja i spuštanja. Slušajući širokopojasni zvuk, kao govor, muziku i šum, čovjek je u svom životu naučio povezivati različite spektralne karakteristike s različitim vertikalnim smjerovima. Ispitivanjima je utvrđeno, kao što prikazuju dijagrami na sl. 2.37, da izdizanje zvučne energije u području nižemu od 500 Hz i oko 3 kHz uzrokuje lokaliziranje „sprijeda". Na osnovi isticanja pojasa oko 1 kHz lokalizirat će se izvor zvuka „straga". Isticanjem pojasa oko 8 kHz dobiva se lokaliziranje „gore". Točnost tih tvrdnji može se provjeriti na taj način da se frekvencijske karakteristike širokopojasnog šuma oblikuju prema onima na sl. 2.37. Tako filtrirani signal daje njemu pripadno lokaliziranje bez obzira na to gdje je izvor zvuka.

---

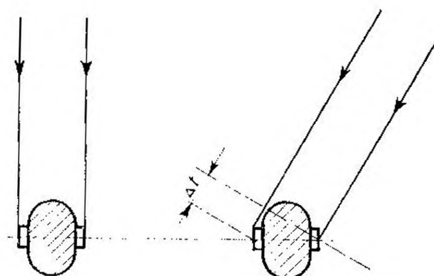
* U vrlo malenih životinja je razmak između ušiju suviše malen da bi se razlika između zvuka što ga prima lijevo i desno uho mogla iskoristiti za zvučno lokaliziranje. Takve životinje, npr. mnogi kukci, imaju zvučne prijemnike koji reagiraju na gibanje zračnih molekula (a ne na zvučni tlak kao u velikih životinja), pa smjer širenja zvučnih valova otkrivaju izravno.

Zanimljiva je pojava da slušajući preko slušalica čovjek ima dojam kao da je izvor zvuka u glavi. Uzrok pogrešnom lokaliziranju valja tražiti u dodatnom filtarskom efektu. Između bubnjića i membrane u slušalici nastaju stojni valovi, pa time uzrokovana spektralna izdizanja i potiskivanja daju drukčiju zvučnu sliku od one kad se sluša izravno. Ako se obratnim filtriranjem ukloni efekt stojnih valova i frekvencijska karakteristika oblikuje tako da je slična onoj pri izravnom slušanju, izvor zvuka se „eksternalizira", lokalizira se izvan glave.



Sl. 2.37. Relativna učestalost kojom su ispitanici sa 95% sigurnosti dali jedan od tri odgovora „straga", „sprijeda" i „gore" češće od druga dva. Ispitivanje je provedeno pomoću tercnog šuma, s nepravilnim slijedom tercnih pojasova i njihove razine i s nepravilnom promjenom rasporeda zvučnika.

U impulsnim zvučnim pojavama lokaliziranje se postiže na osnovi vremenske razlike kojom pristiže zvuk u pojedino uho (sl. 2.38). Osjetljivost čovječjega slušnog organa tako je velika da se već vremenska razlika od tri stotisućinke sekunde (30 μs), što odgovara kutu od 3°, zamjećuje kao pomak izvora zvuka iz ravnine simetrije glave. Vremenska razlika od oko $60 \cdot 10^{-5}$ s daje dojam da se zvučni izvor nalazi sasvim bočno, pomaknut za 90°. Premašuje li vremenska razlika tu vrijednost, izvor se zvuka ne može lokalizirati.



Sl. 2.38. Uz kosi upad zvučnih zraka udaljenije uho prima signal sa zakašnjenjem Δt.

Općenito, akustičku orijentaciju lijevo-desno omogućuje zasjenjivanje što ga uzrokuje glava, a orijentaciju sprijeda-straga zasjenjivanje ušnih školjki.

U prostorijama se lokaliziranje dobiva na osnovi omjera izravnog i reflektiranog zvuka. Čovječji mozak ima sposobnost — osobito uz binauralno slušanje — da razlikuje direktni zvuk od reflektiranoga, pa dajući veću težinu izravnom zvuku lokalizira izvor.

U vodi je brzina zvuka više nego četiri puta veća od one u zraku pa binauralno lokaliziranje nije moguće. Ako je izvor bočno od ronioca, on ga lokalizira kao da je gotovo sprijeda. Da bi se u vodi ispravno lokaliziralo, trebalo bi razmak između ušiju umjetno povećati više od četiri puta.

U prvome su se svjetskom ratu neprijateljski avioni lokalizirali pomoću uređaja koji su se sastojali od cijevi što su se uticale u uši, a na drugom su im kraju bili dodani veliki lijevci. Time se umjetno povećavao razmak između ušiju i dimenzije ušnih školjki pa se moglo točnije lokalizirati.

Također osoba koja ima samo jedno zdravo uho može približno točno odrediti smjer izvora zvuka. Glava se lagano okreće i uho dolazi u različite položaje prema izvoru zvuka pa zbog različitog zasjenjivanja prima razne valne oblike. Takva osoba, uspoređujući zvuk koji upravo prima s onim zapamćenim, uspješno lokalizira izvor.

Uho može sa stanovitom točnošću ocijeniti i udaljenost izvora zvuka. Ta je sposobnost čovjekova jednaka bilo da sluša jednim uhom ili s oba. Za osjećaj udaljenosti važno je da je to tranzijentni zvučni proces koji sadrži komponente sasvim niskih frekvencija.

Binauralno je lokaliziranje prvi istraživao lord *Rayleigh* 1876. godine. U Cambridgeu, na travnatoj površini njegovi su asistenti stajali kružno oko njega i glazbenim su viljuškama proizvodili tonove raznih visina, ili su izgovarali riječi. Rayleigh je zavezanih očiju mogao s relativno velikom točnošću odrediti smjer izvora zvuka. Rezultati tih pokusa pokazali su da se lokaliziranje postiže na temelju razlike zvučnog intenziteta. Također se ustanovilo da je binauralni omjer — tako je Rayleigh nazvao intenzitetnu razliku — manji na niskim nego na visokim frekvencijama. Međutim, binauralno je lokaliziranje moguće i na sasvim niskim frekvencijama, iako u tom području binauralni omjer nestaje, što znači da nema zvučnog zasjenjivanja koje unosi glava. U vezi s tom pojavom Rayleigh je 1907. godine — oslanjajući se na radove *S. Thompsona* — proširio svoju teoriju uvodeći faznu razliku.

Teorijom vremenske razlike poslužili su se tumačeći binauralno lokaliziranje psihofizičari *E. M. von Hornbostel* i *M. Wertheimer*. Oni su svojim pokusima počeli 1920. godine. Iako su se sve tri teorije — intenzitetna, fazna i vremenska — osnivale na neoborivim eksperimentalnim rezultatima, činilo se da su one međusobno suprotne. Tek pokusi koje su 1934. godine proveli *psihofizičari Harvardskog sveučilišta* dali su odgovor na ovo pitanje. Oni su mjerili kutnu pogrešku koja se na raznim frekvencijama pojavljuje pri određivanju smjera izvora zvuka. Ustanovili su da se tonovi niskih frekvencija mogu lokalizirati vrlo točno. Ta točnost opada iznad 1 000 Hz. Između 2 000 i 4 000 Hz pogreška je najveća. Na frekvenciji od 10 000 Hz usmjerno slušanje jednako je tako točno kao na niskim frekvencijama. Tim su ti psihofizičari utvrdili područja u kojima vrijede pojedine teorije.

Binauralno lokaliziranje omogućuje da neki zvuk posebno slušamo uz prisutnost drugog zvuka. Kad istodobno govori više ljudi, uspijeva nam bez ećih teškoća slušati govor jednoga od njih. Na osnovi te osobine čovječjeg sluha, nazvane „*koktelparti-efekt*”, prepoznaje se neki zvuk uz buku ili šum. Ako se diskusije na konferencijama snimaju dvokanalno i isto tako reproduciraju u slušalicama tipkačica, one ih lakše prenose na papir. Sve je to razlog preporuci da i nagluhi slušaju dvama slušnim aparatima kako bi se koristili binauralnim lokaliziranjem, i time poboljšali komunikaciju sa svojom okolinom.

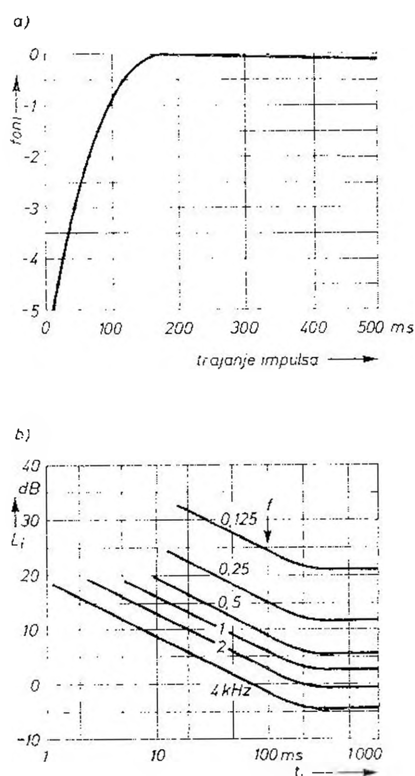
Binauralni efekt pomaže razumijevanju govora koji se sluša preko slušalica u bučnoj okolini. *J. C. R. Licklider* je godine 1948. radeći na problemu boljeg sporazumijevanja s pilotom aviona došao na ideju da jednoj od slušalica obrne priključke. Time je korisni signal postao protufazan, dok je vrlo velika avionska

buka koja je dolazila izravno, pokraj slušalica, ostala istofazna. Rezultat je bio iznenađujući jer se kvaliteta komuniciranja znatno poboljšala.

Iste godine tu je pojavu istraživao *Hirsh*, ali ne govornim već sinusoidnim signalom niske frekvencije. Buka i ton bili su identični na oba uha. Ton je bio takve glasnoće da se uz buku jedva razabirao. Kad se je signal s jednog uha uklonio, njegova je čujnost u drugom uhu porasla kao da se zvučni tlak povisio za desetak decibela. Kako ta pojava nastaje nije u potpunosti rastumačeno.

2.3.12. Vremenske konstante uha

Slušni sustav vrlo je složen mehanički, fiziološki i psihološki organizam, kojemu tromost ne dopušta da trenutno reagira na zvučni podražaj, a isto tako da se nakon njegova prestanka momentano zaustavi. Možemo prema tome govoriti o *vremenu utitravanja* i o *vremenu istitravanja* našega slušnog sustava. Kad izvor zvuka započne emitirati neki ton, glasnoća raste, i tek nakon petine sekunde (200 ms) postigne punu vrijednost (sl. 2.39.*a*). Poslije vršne vrijednosti glasnoća se neznatno snizi, što se pripisuje efektu zamora. Dijagram na sl. 2.39.*b* pokazuje da se ta vremenska konstanta pojavljuje i na pragu čujnosti. Traje li sinusoidni ton dulje od 200 ms, prag je čujnosti na pojedinim frekvencijama konstantan. Uz impulse koji su kraći od 200 ms prag čujnosti se na svim frekvencijama podiže, to više što je impuls kraći.

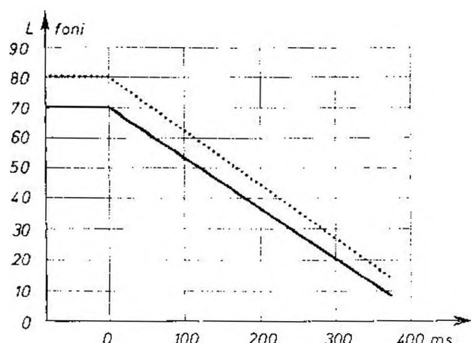


Sl. 2.39. a) **Glasnoća zvuka konstantne amplitude raste nakon početka emitiranja postupno jer sluh ima svoju vremensku konstantu.** b) **Ako signal određene frekvencije traje dulje od vremenske konstante uha, prag je čujnosti konstantan.**

Nagib krivulja praga čujnosti na sl. 2.39.*b* pokazuje da je uz signale kraće od 200 ms zvučni intenzitet obrnuto razmjeran duljini trajanja signala, što znači da je zvučna energija kojom se dobiva čujnost konstantna.

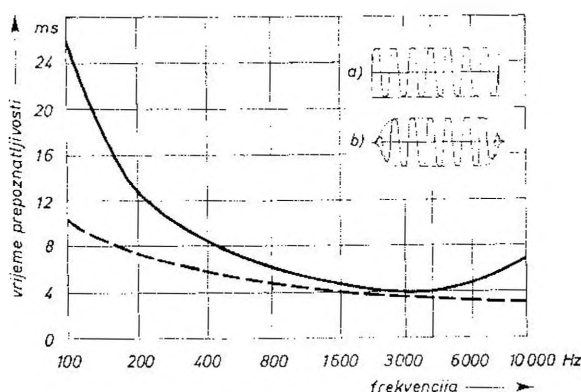
Opadanje glasnoće nakon što je prestao djelovati zvučni izvor izražava se pojmom posuđenim iz akustike prostorija. To je *vrijeme odjeka*, koje je definirano kao vrijeme za koje zvučni tlak u prostoriji padne na tisući dio, ili za 60 dB, od svoje početne vrijednosti. Prema toj definiciji *subjektivno vrijeme odjeka uha*, kao kao što se može otčitati iz dijagrama na sl. 2.40, iznosi oko 0,35 s ili 350 ms. Iz

istog dijagrama se vidi da glasnoća opada po pravcu, smanjujući se svakih 50 ms za 9 fona. I na jednu i na drugu konstantu — vrijeme porasta glasnoće od 200 ms i slušno vrijeme odjeka od 350 ms — praktički ne utječe ni razina glasnoće ni frekvencija.



Sl. 2.40. Istitravanje tona u uhu, čime je određeno „vrijeme odjeka" uha

Vrijeme prepoznavanja tonske visine ovisi o trajanju tonskog impulsa. Svaki kratki tonski impuls ne sadrži samo jednu frekvenciju nego čitav spektar. S obzirom na vrijeme prepoznavanja tonske visine razlika je između impulsa s pravokutnom i onoga sa zaobljenom ovojnicom. Ako je zaobljenost ovojnice takva da je spektar maksimalno uzak, vrijeme prepoznavanja tonske visine znatno je kraće nego uz pravokutnu ovojnicu. Dijagram na sl. 2.41. predočuje frekvencijsku ovisnost vremena prepoznavanja tonske visine za oba oblika tonskog impulsa. Zapaža se kakve velike mogućnosti u tome ima uho. Na frekvenciji od 1000 Hz dovoljne su četiri periode, a na onoj od 100 Hz čak samo jedna pa da uho prepozna tonsku visinu.



Sl. 2.41. Minimalno vrijeme prepoznavanja sinusoidnog tona. Puna linija odnosi se na tonski impuls s pravokutnom, a crtkana na impuls sa zaobljenom ovojnicom.

Izgovor vokala traje od 50 do 300 ms. Konsonanti su često samo procesi utitravanja i istitravanja prethodnih i idućih vokala, s trajanjem od 2 do 40 ms. Najkraći govorni glasovi traju, dakle, upravo toliko koliko je potrebno da se prepozna njihova tonska visina. Zvukovi u govoru i glazbi moraju, općenito, biti

dvoljno dugi da ih uho može tonski analizirati. Istodobno ne smiju prebrzo slijediti jedan za drugim kako u procesu istitravanja jednog zvuka ne bi idući bio maskiran, prekriven. Stoga je ritam govora i glazbe u mnogome prilagođen osobinama sluha.

2.3.13. Osjetljivost sluha na amplitudna, harmonička i fazna izobličenja

Uređaji za reprodukciju zvuka morali bi, idealno, imati horizontalnu frekvencijsku karakteristiku. To vrijedi i za prostoriju u kojoj se izvodi glazba ili u kojoj se sluša reprodukcija. No to se ne može postići kod zvučnika ni u prostorijama. Stoga su provedena istraživanja da se ustanovi kolika odstupanja frekvencijske karakteristike od horizontale uho može osjetiti. Rezultati su pokazali da takve promjene do ± 3 dB ono ne registrira. Prilikom reprodukcije glazbe mogu oktavna spuštanja ispod horizontale biti i do 4 dB pa da ih uho ne otkrije. To vrijedi za područje srednjih i visokih frekvencija. Na sasvim niskim frekvencijama dopuštena su oktavna spuštanja i do 10 dB.

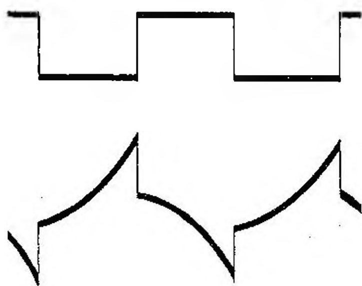
Zbog *nelinearnih prijenosnih karakteristika* što ih imaju pojedini elementi u elektroakustičkom lancu pojavljuju se u reprodukciji nove frekvencije kojih nema u originalu. Čujnost tih frekvencija ovisi o glasnoći i frekvenciji originalna zvuka jer se komponente manjih amplituda gube zbog maskiranja. Na takva, *harmonička izobličenja* uho je najosjetljivije uz razine glasnoće između 50 i 70 fona. Na još višim razinama znatno je izobličenje u samom uhu, pa je ono manje osjetljivo na tu pojavu u reprodukciji.

Sluša li se jedan ton, može se amplituda harmoničkih komponenata mijenjati od 10 do 30% — ovisno o glasnoći i frekvenciji — da se pri tome ne osjeti promjena boje tona. Dva tona zajedno daju osim harmonika i tonove zbroja koji su između harmonika, ali i tonove razlike smještene iznad sviranih tonova i ispod njih. Ako interval između dva svirana tona nije sasvim korektan, što nije rijetko, kombinirani tonovi neće biti u harmoničkom odnosu prema osnovnim tonovima, pa to smeta uhu. Kad je interval između dvaju tonova veći od oktave, onda će dublji modulirati viši ton i učiniti ga „hrapavim".

Ispitivanja su pokazala da je uho osjetljivije na treći nego na drugi harmonik. Također, na niskim frekvencijama mogu se dopustiti veća izobličenja, a da ona ne smetaju. Pri tome je gornja granica za drugi harmonik vrijednost od 2%, a za treći 0,5%. Izuzetno kod reprodukcije sviranja flaute drugi harmonik ne smije premašiti vrijednost od 1%, a treći 0,3%. Ti iznosi vrijede za slušače koji se prema harmoničkom izobličenju odnose vrlo kritički. Iskustvo je pokazalo da se općenito u visokokvalitetnoj reprodukciji glazbe može dopustiti faktor izobličenja od 3%, a za govor čak 5—10%.

Uho je na *fazna izobličenja* drukčije osjetljivo kad prima stacionarne tonove nego kad su to tranzijentne zvučne pojave kao govor i muzika. Na sl. 2.42. oscilogrami su dvaju valnih oblika koji imaju jednake sastavne komponente, ali je međusobni fazni odnos komponenata u drugome drukčiji nego u prvome. Pri pokusnom slušanju preko zvučnika nitko u skupini od stotinu slušača nije mogao razlikovati ta dva primjera. U tranzijentnim zvučnim pojavama uho je posebno osjetljivo na fazna izobličenja. U laboratoriju *Harman-Kardon Inc.* (SAD) izvedeni su pokusi u vezi s utjecajem faznog izobličenja na niskim frekvencijama. U pojačalu se na frekvenciji od 20 Hz pomoću sklopke mijenjao fazni kut za samo 3°, bez promjene

amplitude. Svi slušači, oni uvježbana i oni neuvježbana sluha, pri reprodukciji su faznu razliku osjetili kao promjenu u kvaliteti.



Sl. 2.42. Ako se sve komponente pravokutnog signala više od 400 Hz (gore) obrnu u protufazu, dobiva se promijenjeni oscilogram (dolje). Sluhom se ne razlikuje jedan signal od drugoga.

Područje visokih frekvencija ispitivalo se u *Francuskome nacionalnom centru za telekomunikacije*. Pomoću specijalnog zvučnika reproducirali su se filtrirani i nefiltrirani impuls. Prvi od spomenutih dobili su se propuštanjem kroz promjenljivi niskopropusni filtar kojemu je početak prigušivanja bio na frekvenciji od 20 kHz i na višima od toga. Slušači su uvijek mogli razlikovati filtrirane impulse od nefiltriranih iako je filtriranje provedeno izvan čujnog područja. Tome je bio uzrok fazno izobličenje koje je filtar unosio u čujno područje.

Prema Ohmovu akustičkom zakonu slušni prijem ovisi samo o amplitudnom spektru zvuka i neovisan je o faznom kutu frekvencijskih komponenata koje spektar sadržava. Kasnija su istraživanja modernim tehničkim sredstvima pokazala da Ohmova tvrdnja ima sasvim ograničenu vrijednost. Tako je npr. *M. R. Schroeder* pokazao da se sintetičnim valnim oblikom koji je u frekvencijskom području od 100 do 3100 Hz sadržavao 31 harmonik jednakih amplituda mogu, mijenjajući fazu odabranih harmonika i ne dirajući njihovu amplitudu, svirati jednostavne melodije („fazne orgulje").

2.3.14. Ultrazvučno prostorno orijentiranje u nekih životinja

Za akustičko snalaženje u prostoru neke životinje imaju neusporedivo pouzdaniji sistem nego čovjek. One proizvode vrlo snažne ultrazvučne krikove ili impulse koje nakon odraza od okolnih ploha ili predmeta hvataju ušima, mjereći tako udaljenost i dimenzije plohe od koje su se impulsi reflektirali. Služeći se svojim akustičkim „radarom" mogu te životinje letjeti u potpunoj tami, ili plivati u mutnoj vodi, bez opasnosti da će udariti u neku zapreku. Dakako, primarna je svrha tog odašiljačko-prijemnog sistema hvatanje drugih, manjih životinja koje služe za hranu. Najpoznatiji predstavnici takvih „radarom" opremljenih životinja su *šišmiš* i *dupin*.

Tehnikom prostornog orijentiranja na temelju impulsnog odašiljanja i prijema reflektiranih impulsa, dakle *eholokacijom*, čovjek se počeo služiti tek u prvoj polovici ovog stoljeća. Aparatima na tom principu otkrivale su se za vrijeme prvoga svjetskog rata neprijateljske podmornice. Danas se takvi uređaji upotrebljavaju i za mirnodopske svrhe, pri mjerenju morske dubine, otkrivanju — ribljih jata itd., a nazivaju se *sonari* kratica od engleskog izraza *SOund NAvigation and Ranging* — akustička navigacija i mjerenje udaljenosti. Zračnim „sonarima" mogu se uspješno koristiti slijepi ljudi. Radar (od engleskog izraza *RAdio Detection And Ranging* — otkrivanje i mjerenje udaljenosti pomoću radio-valova) naziv je za uređaj koji radi na istom principu, ali umjesto zvučnih upotrebljava radio-valove. Radarski princip otkrio je naš slavni *Nikola Tesla* i opisao ga još 1900. godine u jednome američkom časopisu.

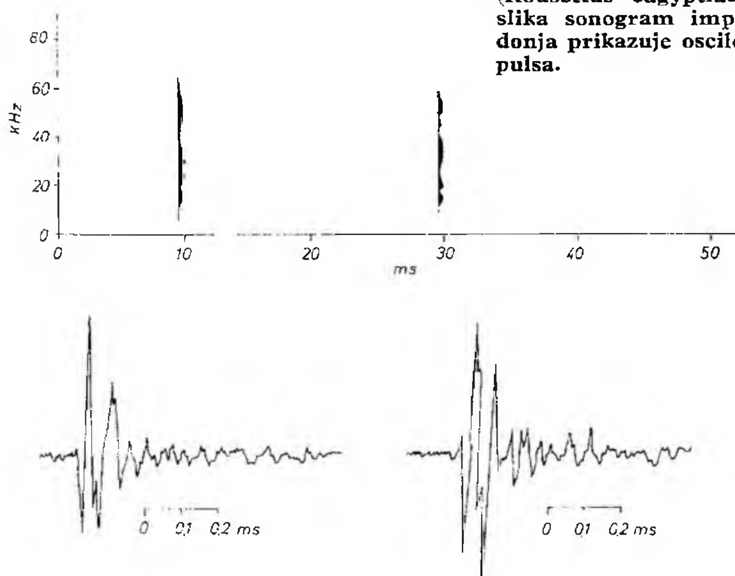
Različite vrste šišmiša služe se frekvencijskim područjima između 10 i 120 kHz. Ultrazvučni krikovi u nekih su vrsta vrlo snažni i dosežu čak do 125 dB na udaljenosti od 10 cm od šišmiševe glave. Budući da je zračna apsorpcija zvuka na ultra-

zvučnim frekvencijama vrlo velika — a k tome se često najveći dio zvučne energije apsorbira na plohi od koje se reflektira — mora sluh šišmišu biti izvanredno oštar. Pokusima je utvrđeno da se on vrlo dobro snalazi i u „gluhoj komori" u kojoj granične plohe odbijaju samo 0,1% upadne energije zvuka.

Šišmiševi krikovi ili impulsi vrlo su kratki, čak do 2 ms (sl. 2.43). Učestalost im se kreće od nekoliko njih u sekundi, kad slobodno leti, pa do čak 200 impulsa u sekundi, kad se približava insektu koji brzo leti. Pri lovu, ne uspije li žrtvu zgrabiti zubima, zahvati je repom ili krilom i ubaci u usta.

Izbor ultrazvučnih frekvencija za snalaženje nije u šišmiša slučajan. Ako je valna duljina mnogo veća od dimenzija objekta, odraza praktički nema jer val zaobiđe objekt (vidi sl. 1.32). Sa skraćivanjem valne duljine, dakle s porastom frekvencije, povećava se oštrina raspoznavanja objekta. Kako velike mogućnosti u tome ima šišmiš, utvrđeno je pokusom u kojem su šišmiši letjeli između napetih žica različita promjera. Neke vrste šišmiša mogle su letjeti između žica promjera od samo 0,05 mm, a da ih ne dodirnu.

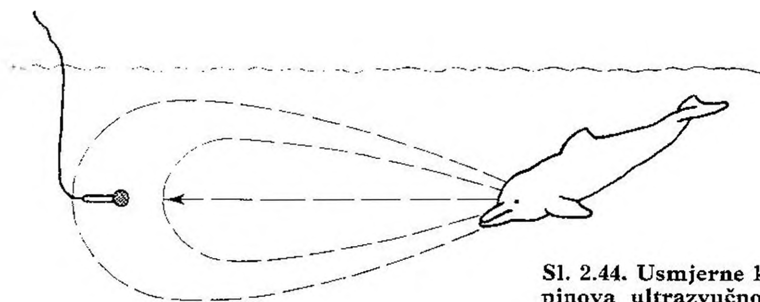
Glasiljke su u šišmiševu grlu dvije izvanredno tanke membrane (oko 0,001 mm) napete jakim mišićima. Dok se proizvode krikovi, uho treba da bude zaštićeno od zaglušivanja kako bi odmah nakon krika bilo sposobno za prijem slabih reflektiranih signala. To se postiže dvama mišićima (kao i u čovječjem uhu), od kojih jedan napinje bubnjić, a drugi povlači stremen, smanjujući osjetljivost uha za vrijeme odašiljanja. Mišići se stegnu 6—15 ms prije nego se impuls počne odašiljati, a opuštaju se 5—6 ms po završetku impulsa. Stezanjem mišića smanji se glasnoća vlastitog krika za 30 dB.



Sl. 2.43. Ultrazvučni impulsi šišmiša (Rousettus aegyptiacus). Gornja je slika sonogram impulsnog para, a donja prikazuje oscilograme tih impulsa.

Noćni leptiri (i drugi insekti) kojima se šišmiš hrani mogu primati zvukove na ultrazvučnom području. Leptir traži spas strmoglavljujući se prema zemlji ili počne letjeti u cikcak-liniji.

Neke se vrste šišmiša služe impulsima konstantne frekvencije dugima od 20 do 40 ms, nakon čega u toku nekoliko milisekunda frekvencija linearno opada. Dok hvata pokretni plijen, do šišmiševih ušiju vraća se — zbog Dopplerova efekta — drukčija frekvencija od one koja je odaslana. Ako se npr. kukac kreće prema šišmišu, primana frekvencija je viša, a u obratnom slučaju bit će niža. Budući



Sl. 2.44. Usmjerne karakteristike dupinova ultrazvučnog emitera

da je šišmišev sluh oštro ugođen na stalnu frekvenciju (npr. u šišmiša *Rhinolophus ferrumequinum* to je 83 kHz, i na tu frekvenciju njegov sluh je najosjetljiviji), on korigira frekvenciju u svojim impulsima naviše ili naniže kako bi se poništila promjena primane frekvencije nastala Dopplerovim efektom, tj. da bi uvijek primao samo 83 kHz. To mu uspijeva u vrlo kratkom vremenu, od 0,2 do 0,5 s. Prag razlikovanja frekvencije u šišmiša izvanredno je nizak, čak 0,05% apsolutne frekvencije. Zbog toga može emitiranu frekvenciju prilagođivati svome sluhu već uz brzinu plijena od 10 cm/s. Takva vrsta šišmiša ima dva odijeljena sonara; sluh je posebno ugođen za prijem konstantne frekvencije i posebno za primanje frekvencijski moduliranog impulsa. Duljinu emitiranja konstantne i promjenljive frekvencije šišmiš prilagođuje prilikama. Pri tome pomoću konstantne frekvencije prati cilj, a promjenljiva omogućuje da akustički nadzire okolinu kako ne bi udario o neku zapreku. U svemu tome velika su pomoć vrlo pokretljive ušne školjke, a također i pokreti glavom.

Dupin je zbog svoje druželjubivosti i visoke inteligencije osobito pogodan da se njime eksperimentira. Zanimljivo je da do danas nije otkriveno kako on proizvodi svoje ultrazvučne impulse. Kao što pokazuje dijagram na sl. 2.44, usmjerna karakteristika ima najveću vrijednost u vodoravnom smjeru kad je glava dupinu nagnuta prema dolje.

Za međusobno sporazumijevanje dupini se služe frekvencijama do 20 kHz. Prema nekim izvještajima, običan dupin reagira na frekvencije čak do 280 kHz. Slušni organ nije građen kao u ribe, već je sličan onome u kopnena sisavca. Očito, dupin je prije mnogo milijuna godina živio na kopnu i nakon prelaska u vodu nije mu se slušni mehanizam bitno promijenio. Njegovo srednje uho, u kojem su slušne koščice, ispunjeno je zrakom. Ipak, on je počeo primati zvuk na sasvim drukčiji način jer kohlearne reakcije ostaju nepromijenjene ukloni li se bubnjić. Smatra se da do unutrašnjeg uha zvuk stiže preko cijele glave, da je ona, dakle, „prozirna" za zvuk. Ako je ta hipoteza točna, usmjerenost slušanja dobiva se na temelju vremenske razlike u kojoj pristižu zvučni valovi u jedno i u drugo uho. Kolika je dupinova sposobnost da se orijentira, otkrilo se pokusom u kojemu je on, našavši se u potpunoj tami pred zaprekom od stakla ili žičane mreže s uskim otvorom, uvijek i bez najmanjeg oklijevanja uspijevao naći prolaz. U drugom pokusu dupin je mogao u jednoj sekundi iz određene udaljenosti razlikovati dvije čelične kugle promjera od 6,3 cm i 5 cm sa stopostotnom točnošću.

Šišmiševu orijentaciju pomoću sluha otkrio je *Lazzaro Spallanzani*. On je 1793. godine oslijepivši tu životinjicu ustanovio da ona i dalje sigurno leti i izbjegava zapreke. Ta pojava ostala je neprotumačena gotovo stoljeće i pol. Tek je 1920. godine fiziolog *H. Hartridge* iznio mišljenje da se u letu šišmiši služe visokofrekvencijskim krikovima. Godine 1938. *G. W. Pierce* je eksperimentirao pomoću zvučnog detektora koji je ultrazvučne titraje transponirao u čujno frekvencijsko područje. Prema ideji svog studenta *Donalda R. Griffina* stavio je Pierce detektor pred krletku sa šišmišima. Budući da su se tad čuli različiti šumovi, Pierce i Griffin su zaključili da šišmiši proizvode nepravilne ultrazvučne glasove. Iduće godine je Griffin sa studentom fiziologije *Robertom Galambosom* nastavio pokuse. Otkrili su da šišmiš iz grla odašilje vrlo usmjeren niz ultrazvučnih impulsa i da se orijentira osluškujući njihovu jeku.

Glava treća

GOVOR I MUZIKA

Kad se prostorije akustički projektiraju treba misliti na fizikalne osobine govora i muzike. Opisat ćemo ukratko najvažnije od njih.

Općenito se drži da je od svih osjetila za intelektualni razvoj čovjeka, prema tome i čovječanstva, važniji vid, a tek onda sluh. Donekle to potvrđuje i podatak prema kojemu je informacioni kapacitet vida oko sto puta veći od onoga koji ima sluh. Izraženo u jedinicama koje se upotrebljavaju u teoriji informacija, čovjekov vidni kapacitet iznosi $3 \cdot 10^6$ bita u sekundi, a slušni $3{,}5 \cdot 10^4$ bita u sekundi. No uza sve to najviši komunikacijski oblik nije se razvio u vezi s vidnim, nego sa slušnim osjetilom.

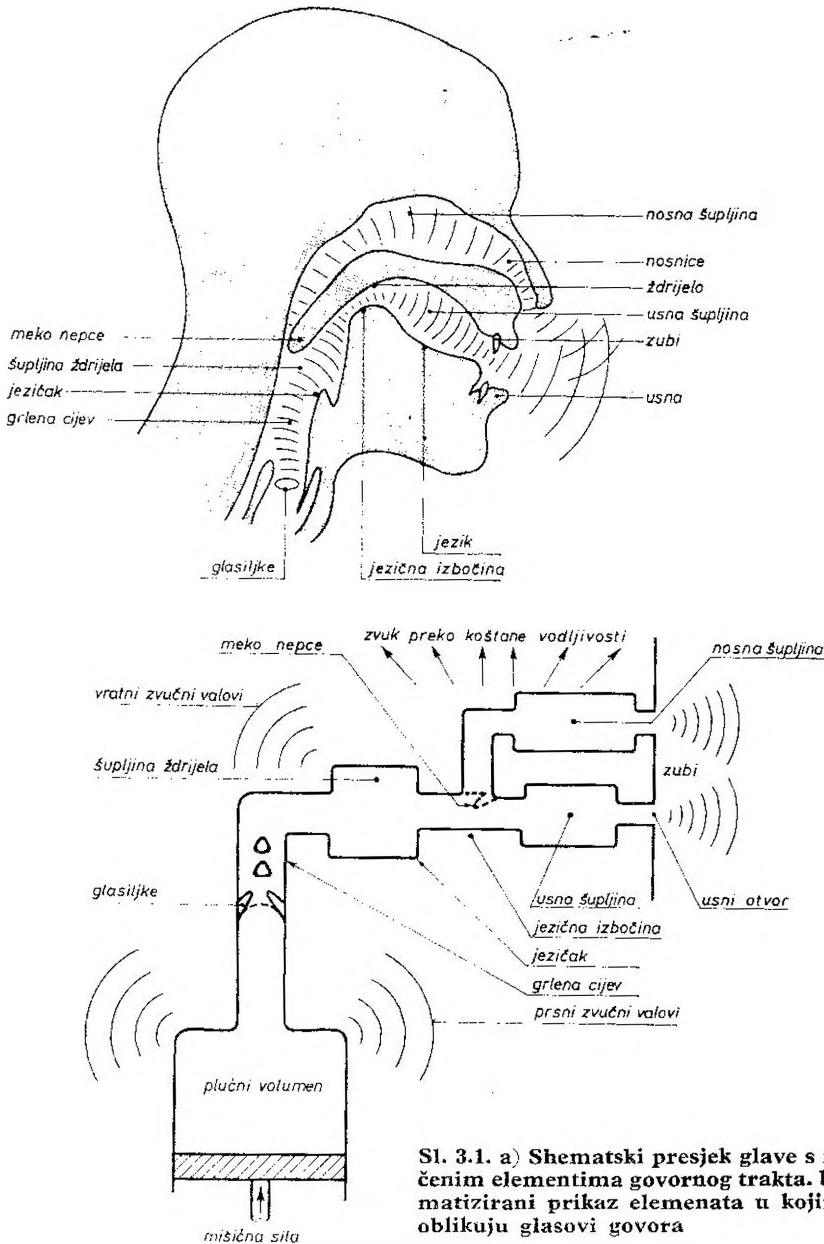
Da bi se mogla prenijeti neka obavijest, potreban je i odašiljački i prijemni organ. Kad čovjek upotrebljava optički komunikacijski sistem, služi se gestama i mimikom, kao što to čine gluhi ljudi. Ruke i lice su tu odašiljač, a oči prijemnik. Za optičke komunikacije potreban je, dakle izvor svjetlosti — u tami optička veza nije moguća. Bez tehničkih pomagala optički se signali mogu prenijeti samo na male udaljenosti, i to pravocrtno, jer svjetlost ne može zaobići fizičke zapreke ni prolaziti kroz njih. Pri tome se čovjek služi rukama, kojima se zbog toga ne mogu istodobno obavljati drugi poslovi. Također, upućujući poruke rukama troši se prilično velika energija. Rezultat takva prijenosa informacija nije bogat jer se mimikom i gestama može postići relativno malen broj različitih znakova, i to u sporom slijedu. Općenito se znakovnim govorom može nešto priopćiti samo o stvarima koje su u blizini onih što razgovaraju. Prirodne su čovjekove mogućnosti u optičkom odašiljanju informacija, dakle, neusporedivo siromašnije nego što su one kod optičkog prijema.

Za glasovnu komunikaciju čovjek ima govorni organ kao odašiljač i slušni organ kao prijemnik. Njegov se govorni organ služi energijom pluća, pa nije ovisan o vanjskom izvoru. Zvučni valovi zaobilaze zapreke, a kroz jednostavnije prolaze ne slabeći izrazitije. Nosilac je informacija akustička energija koja sadržava vremenske, intenzitetne i frekvencijske promjene. Govornim organom može se proizvesti velik broj različitih glasovnih znakova, i to vrlo brzo, oko pet u sekundi. Glasovni su elementi otporni prema izobličenjima, interferentnim pojavama i drugim smetnjama. U govoru se upotrebljavaju apstraktni simboli koji kao kombinacija akustičkih znakova nemaju nikakve izravne veze sa stvarima na koje se odnose. Riječima se mogu označiti predmeti prostorno i vremenski udaljeni od govornika. Mogućnosti akustičkog govora neusporedivo su veće od onih u znakovnom govoru. To je razlog što je akustički govor postao ne samo sredstvo za međuljudsku komunikaciju nego i instrument samoga ljudskog uma. Stoga je razumljivo da su gluhi od rođenja mnogo više oštećeni u intelektualnom i emotivnom razvoju nego oni koji su od rođenja slijepi.

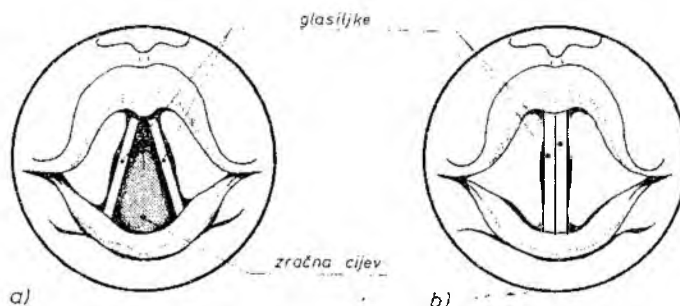
Glazba je oduvijek čovjeku bila ugodnija za slušanje nego druge zvučne pojave. Zašto je to tako, znanost je otkrila tek u novije vrijeme, kad je napredak fizike i tehnike omogućio da se upoznaju fizikalne osobine muzičkih zvukova. Oni se od drugih zvukova razlikuju svojim relativno jednostavnim periodičnim spektrom. U tome su izuzeci neki perkustički instrumenti, npr. bubanj.

3.1.1. Organ za govor

Čovjek proizvodi glasove na taj način što potiskuje zrak iz pluća kroz glasiljke i usnu šupljinu (sl. 3.1), pri čemu se energija strujanja pretvara u zvučnu energiju. Glasiljke su dva paralelna mišića koji se mogu međusobno približiti i udaljiti, tvoreći tako veću ili manju pukotinu za prolazak zraka (sl. 3.2). Duljina glasiljki u muškarca je 20—24 mm, a u žene 18—20 mm. Pomoću mišića vezanih za stijenke grkljana može se mijenjati napetost, duljina i debljina glasiljki.



Sl. 3.1. a) Shematski presjek glave s naznačenim elementima govornog trakta. b) Shematizirani prikaz elemenata u kojima se oblikuju glasovi govora

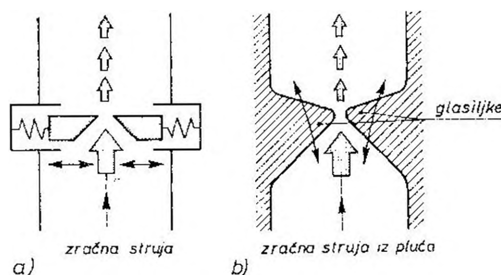


Sl. 3.2. Položaj glasiljki: a) za vrijeme disanja i b) pri izgovoru glasova

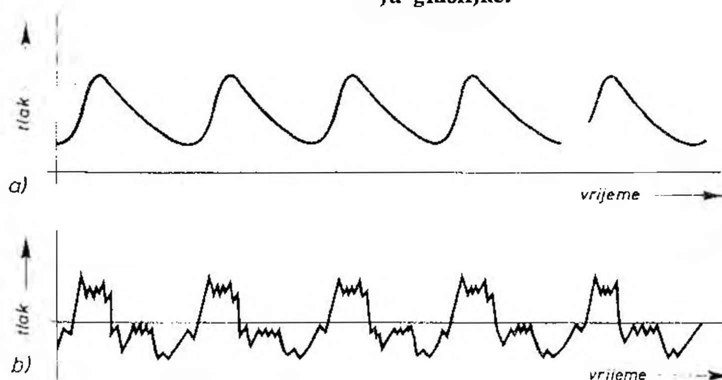
3.1.2. Govorni mehanizam

Shematski prikaz presjeka glasiljki je na sl. 3.3. Pod djelovanjem zračnog tlaka koji stvaraju pluća glasiljke se razmaknu i tlak padne. Zatim se one opet stisnu, zbog čega zračni tlak poraste. Ta igra glasiljki neprestano se ponavlja. One, dakle, izvode *relaksacijsko titranje* i u tom se ritmu modulira zračna struja.

Glasiljke ne titraju sinusoidno, već s obilnim sadržajem harmonika. Zvučni valovi na svom putu u vanjski prostor nailaze na šupljine koje rezonancijom ističu harmonike. Na sl. 3.4.*a* prikazana je promjena tlaka na mjestu glasiljki kad se izgovara glas *e*. Pri prolasku zvučnih valova kroz govorni kanal ističu se neki viši harmonici, što se vidi na sl. 3.4.*b*, koja prikazuje izmjeničnu komponentu na izlazu iz usta.

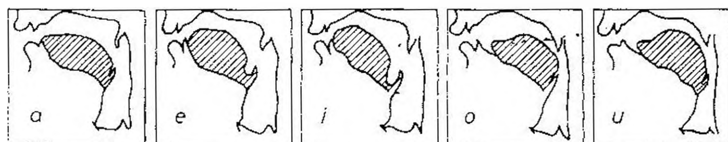


Sl. 3.3. a) Zviždaljka u kojoj se modulira zračna struja i time proizvodi zvuk. b) Slično kao u zviždaljki, u grlu zračnu struju iz pluća moduliraju glasiljke.



Sl. 3.4. Dijagram zvučnog tlaka pri izgovoru glasa E: a) na izlazu iz glasiljki i b) u ustima i u nosu

Govorni kanal, a naročito usta, poprimaju za svaki glas odreden oblik i položaj. To se može provjeriti. Govorni se kanal pripremi za izgovor npr. glasa *a*. Ako se tad nekim tvrdim predmetom (npr. olovkom) lupka po zubima, čuje se zvuk karakterističan za taj glas. To vrijedi i za ostale samoglasnike (vokale). Izgovaraju li se redom glasovi *a*, *e*, *i*, *o*, *u*, i stavi li se prst na jezik, može se osjetiti kako se on podiže sve više da bi se smanjio rezonantni prostor (sl. 3.5).



Sl. 3.5. Položaji jezika i usta pri izgovoru vokala

Samoglasnici su posve periodičan zvučni proces. Poluvokali *m*, *n*, *r*, *l* nisu strogo periodični. Tu glasiljke nisu jedini izvor zvuka jer on nastaje i na drugim mjestima: strujanjem zraka kroz šupljine govornog kanala, te od vrtloga. Bezvučni suglasnici (konsonanti), kao što su *s* i *c*, nastaju strujanjem kroz šupljine govornog kanala i vrtloženjem na suženim mjestima, osobito zubima. Eksplozivni glasovi *p*, *t*, *k*, *b*, *d* i *g* oblikuju se naglim otvaranjem zračnog puta.

3.1.3. Karakteristike govornog zvuka

Najniže čujne frekvencije ljudskog govora kod muškarca su u blizini 80 Hz, a kod žene oko 120 Hz. Opseg frekvencija i spektralni sastav pojedinih glasova vrlo su različiti. Viši harmonici samoglasnika nisu po frekvencijskom spektru raspoređeni jednoliko, već su grupirani u jedno ili dva područja koja se nazivaju *područjima formanata*. Formanti su sastavni tonovi što određuju svojstva vokala gotovo neovisno o osnovnoj frekvenciji. U tablici 3.1. razvrstana su područja formanata.

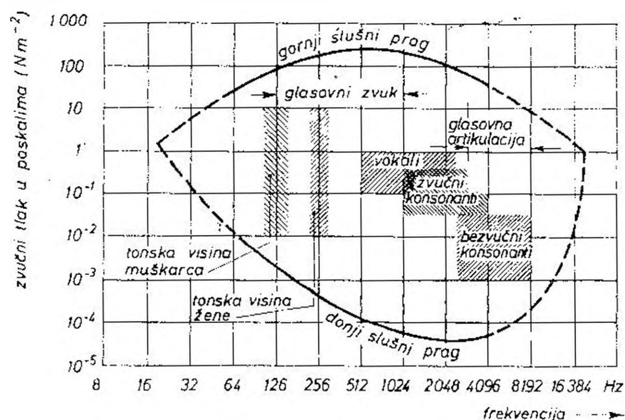
Tablica 3.1.

Vokal	Područje formanata
u	200 – 400 Hz
o	400 – 600 Hz
a	800 – 1200 Hz
e	400 – 600 i 2 200 – 2 600 Hz
i	200 – 400 i 3 000 – 3 500 Hz

Pri izgovoru riječi samoglasnici nemaju konstantnu frekvenciju. To vrijedi i za njihove formante. U rečenici su promjene frekvencije vokala i njihovih formanata relativno velike. Time se dobiva „rečenična melodija", bez koje bi govor zvučao monotono, kao da je proizveden strojem.

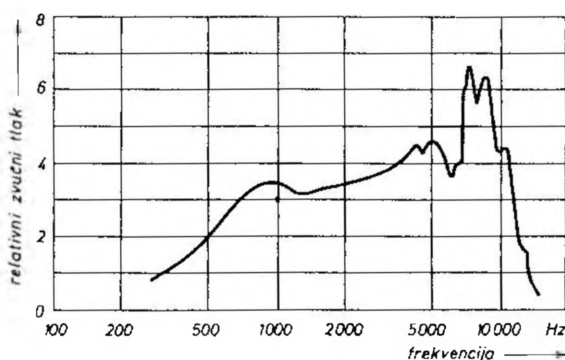
Područja formanata u tablici 3.1. vrijede i za ženske i za muške glasove, iako su osnovne komponente ženskih glasova za oktavu više od onih u muških glasova (vidi sl. 3.6). Formantne se frekvencije iz kompleksnoga osnovnog valnog oblika izdvajaju i pojačavaju učinkom rezonantnih šupljina u govornom traktu. Budući da je u prosjeku glava ženske i muške osobe jednako velika, to su jednake i rezonantne šupljine. Zato nema „ženskih" i „muških" formanata. Razlika u visini osnovnih glasovnih komponenata nastaje zbog razlike u dimenzijama glasiljki između žene i muškarca.

Ipak, prema istraživanjima *Pottera* i *Steinberga* formantne frekvencije su u ženskih glasova nešto više od onih u muških, a u dječjih znatno više.



Sl. 3.6. Položaj osnovnih tonova govornih i formantnih područja unutar slušne plohe

U usporedbi sa samoglasnicima suglasnici imaju vrlo malu zvučnu energiju. To je razlog zbog kojeg se u velikim dvoranama teško može razumjeti govor. Konsonantima su frekvencije mnogo više nego kod vokala. Tako su komponente glasa *s* velike još i na frekvencijama oko 12000 Hz. To se vidi iz dijagrama na sl. 3.7. koji pokazuje da je spektar tog glasa kontinuiran.

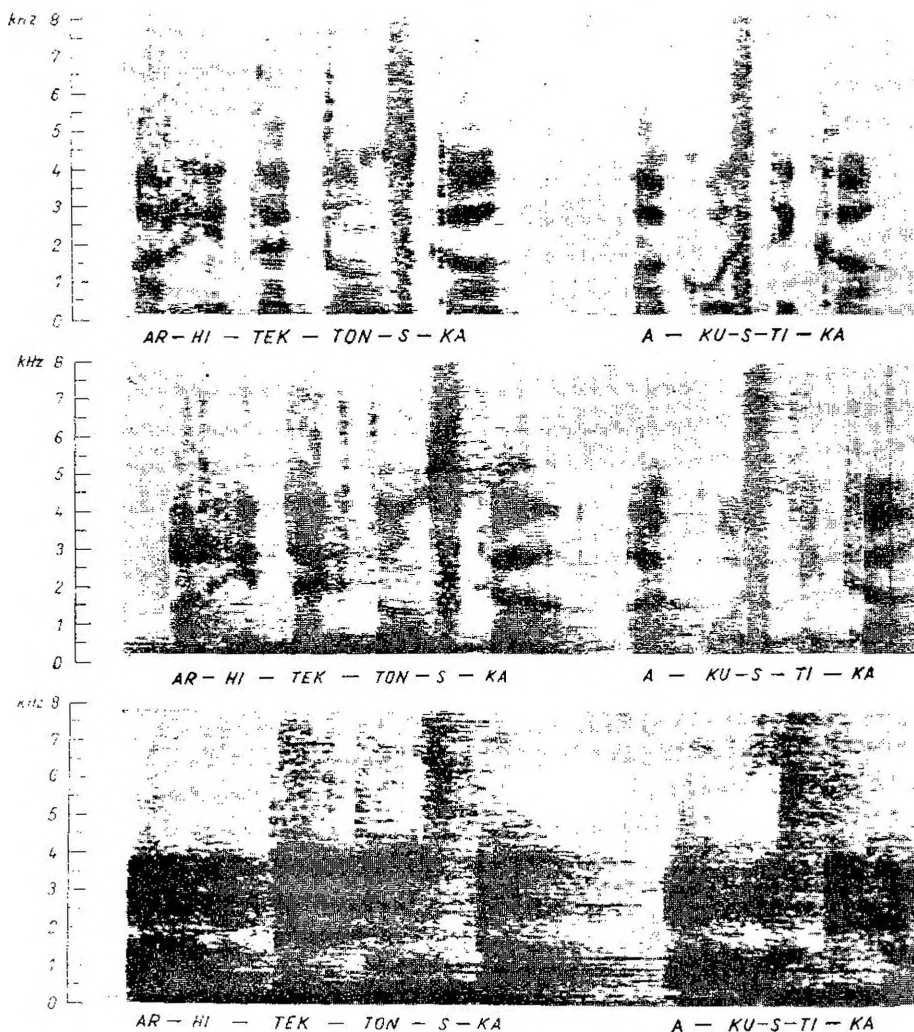


Sl. 3.7. Kontinuirani spektar glasa S

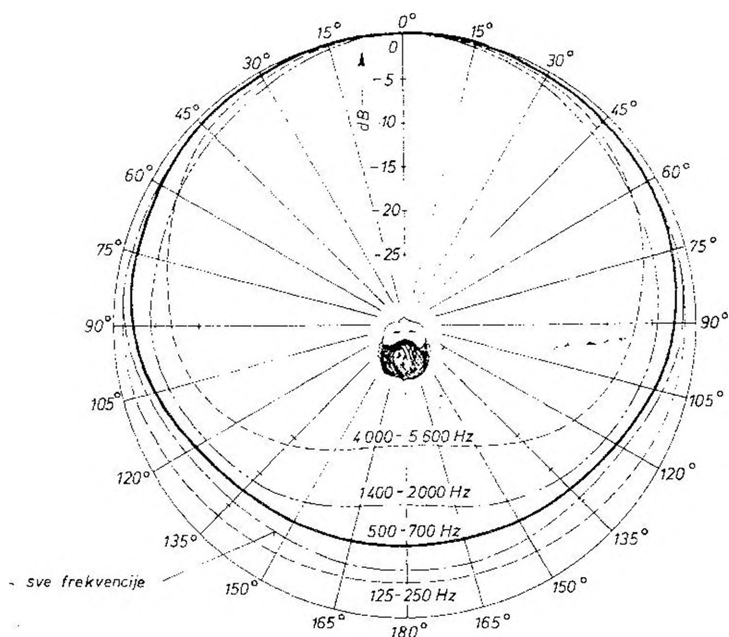
Za analizu govornih glasova mnogo se primjenjuje postupak *„vidljivog govora"* *(visible speech)*. Pri tome se upotrebljavaju filtri kojima je širina 300 Hz.

Na sl. 3.8. vidimo spektrogram dviju riječi snimljen metodom „vidljivog govora", i to, prvo, bez odjeka, zatim s dodanim malim odjekom, te s većim odjekom.

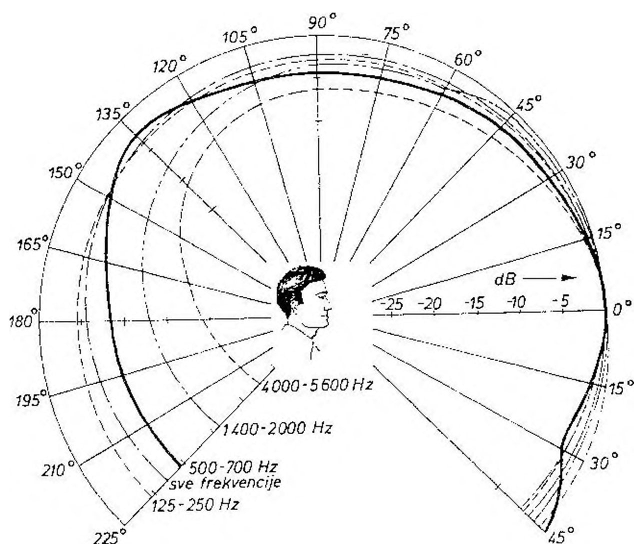
Kad je u pitanju razumljivost govora u nekoj dvorani, treba misliti i na usmjernu karakteristiku izgovorenih glasova. Na sl. 3.9. usmjerna je karakteristika u horizontalnoj ravnini za neka tonska područja u govoru. Dijagrami pokazuju približno jednoliko širenje samo unutar kuta od ± 45°. To vrijedi i za vertikalnu ravninu, što se vidi iz usmjerne karakteristike na sl. 3.10.



Sl. 3.8. Analiza dviju izgovorenih riječi postupkom „vidljivog govora". Gornja je slika snimljena uz uvjete bez odjeka, srednja s malim odjekom, a donja uz velik odjek.



Sl. 3.9. Usmjerne karakteristike govornog organa; raspodjela zvučnog tlaka u horizontalnoj ravnini za nekoliko frekvencijskih pojasova u govoru



Sl. 3.10. Usmjerne karakteristike govornog organa u vertikalnoj ravnini za nekoliko frekvencijskih pojasova u govoru

S porastom brzine zvuka povisuju se i rezonantne frekvencije rezonatora. U vezi s govorom ta je pojava izražena npr. kod ronilaca koji na velikim dubinama udišu smjesu kisika i helija. Omjer tih plinova na 100 metara pod morskom površinom iznosi 10 : 90, a na većim dubinama postotak se kisika sve više smanjuje, a helija povećava. Uz spomenuti omjer 10 : 90 brzina je zvuka nešto više od dva puta veća nego u zraku. Time se i rezonantne frekvencije rezonatora u govornom

traktu više nego dvostruko povise. Na govor to tako utječe da formantima samoglasnika poraste frekvencija za više od oktave, što govor čini praktički nerazumljivim. Jedna od metoda na osnovi koje se može sporazumijevati i u tim uvjetima sastoji se u tome što se govor snima na magnetofon, a zatim reproducira smanjenom brzinom.

Na Svjetskoj izložbi u New Yorku 1939. i u San Franciscu 1940. godine demonstriran je uređaj nazvan *voder* (engl. *VOice DEmonstration operatoR*) kojim se proizvodio *umjetni* ili *sintetički govor*. U voderu su električki izvori govornih frekvencija generator tonskih frekvencija i generator šuma. Prvim od tih generatora proizvode se samoglasnici, a pomoću drugoga suglasnici. Generatori se mogu izmjenično priključivati na ulaz sistema s filtrima. Ukapčajući i iskapčajući filtre oblikuje se spektar napona koji se privodi zvučniku. Uvježbani operator može proizvesti razumljiv govor, prekapčajući generatore, ukapčajući i iskapčajući filtre, te mijenjajući visinu tona tonskog generatora kako bi se dobila rečenična melodija.

Uređajem nazvanim *vokoder* (engl. *VOice CODER*) također se proizvodi sintetički govor. No dok voderom upravlja čovjek, vokoder se regulira signalima koji se dobivaju električkom analizom i obradom živog govora. Najveća vrijednost vokodera je u tome što se pomoću njega govor može telefonski prenositi preko vrlo uskoga frekvencijskog pojasa. Na mjestu odakle se odašilje signali iz mikrofona ulaze u analizator koji izdvaja frekvencije potrebne da bi se upravljalo voderom. Telefonskim kanalom prenosi se samo *govorni kod*. Na kraju telefonskog kanala voder pretvara govorni kod preko slušalice u govor.

U normalnoj telefonskoj vezi prenose se frekvencije od 300 do 3 200 Hz, dakle frekvencijski pojas širine od približno 3 000 Hz. Uz pomoć vokodera potrebno je telefonskim kanalom prenositi pojas koji ima širinu od samo 300 Hz, što znači da se frekvencijski pojas komprimira u omjeru 10 : 1. Na taj način normalnom se telefonskom linijom istodobno prenosi mnogo kodiranih telefonskih razgovora koji se na mjestu prijema sintetiziraju u razumljiv govor. Vokoder se upotrebljava i u različite druge svrhe, kao što su: istraživanje govora, kompjutorizacija govora, šifriranje govora, poučavanje u govoru teško nagluhih, sporazumijevanje s radnicima koji rade u atmosferi drukčijoj od zraka (npr. ronioci) itd.

3.1.4. Zvučna snaga govora

Akustička energija koju čovjek proizvodi kad govori izvanredno je mala. Snaga je običnog razgovora oko 10 μW. To je prosječna vrijednost, u koju su uključene vršne vrijednosti i stanke. Međutim, između govornika i govornika velike su razlike, tako da jedni proizvode i do 500 μW akustičke snage, a drugi manje od 1 μW. Kod istog govornika može akustička snaga varirati od 0,1 μW do nekoliko tisuća mikrovata. U tablici 3.2. glasnoće su koje se uz normalne okolnosti dobivaju na udaljenosti od jednog metra od govornika.

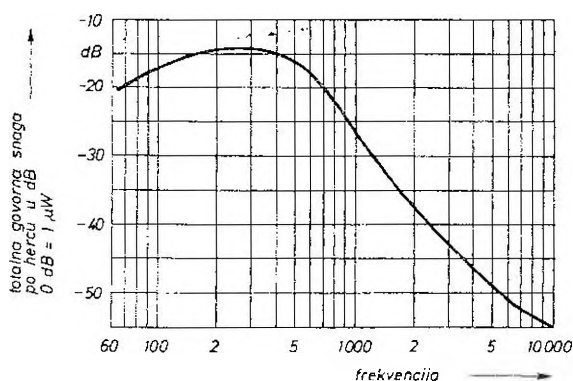
Tablica 3.2.

Tiho šaptanje	17 fona
Govor srednje glasnoće	57 ,,
Vrlo glasan govor	77 ,,
Vršne vrijednosti vrlo glasnog govora	84 ,,

Zbog male govorne snage gustoća je zvučne energije u nekoj velikoj dvorani vrlo mala. To je razlog što već i slaba buka, npr. ventilatora ili koja prodire kroz zidove izvana, može onemogućiti da se razumije govor.

Da bi govor u velikoj dvorani postao razumljiviji govornik mora govoriti glasnije. Kad se govori vrlo glasno, glas postaje viši, pa se kaže da govornik govori „povišenim" glasom. Razumije se da tad nastaje promjena i spektralnog sastava glasova.

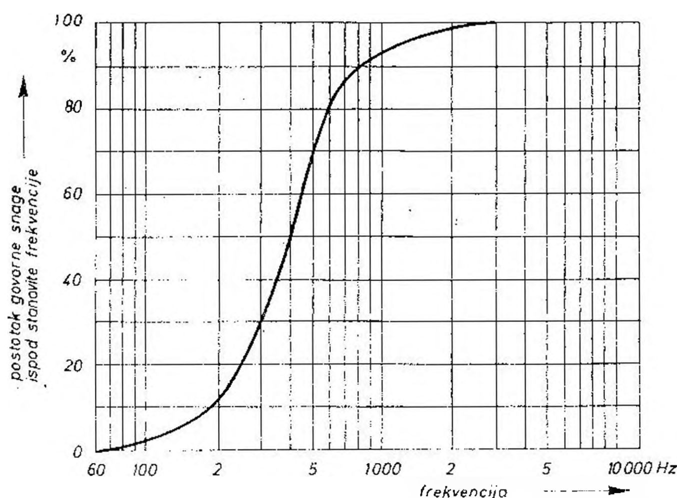
Osnovni ton u glasu muškarca najčešće je negdje između 100 i 125 Hz, a kod žene je oktavu viši, dakle, između 200 i 250 Hz. Na sl. 3.11. prikazana je ovisnost ukupne govorne energije po hercu o frekvenciji. Na raspodjelu energije što je prikazuje ta krivulja utjecala je učestalost frekvencija i intenzitet na pojedinim frekvencijama. Vrh krivulje, kao što se vidi, pada u područje od oko 300 Hz. Ako se uzme u obzir osjetljivost uha na pojedine tonove, onda je maksimum negdje između 500 i 1 000 Hz.



Sl. 3.11. Frekvencijska karakteristika raspodjele zvučne snage u govoru mjerene u intervalima od 15 s

Sl. 3.12. predočuje koji je dio govorne snage ispod stanovite frekvencije. Iz dijagrama izlazi da je govorna snaga iznad 1 000 Hz relativno sasvim mala.

Kad se izgovaraju pojedini glasovi, pojavljuju se i infrazvučne komponente. U to se možemo uvjeriti ako pri izgovoru glasa *p* držimo dlan ispred usta. Na dlanu ćemo osjećati zračni udar, a takvi udari imaju u svom spektru jake infrazvučne, dakle nečujne komponente.



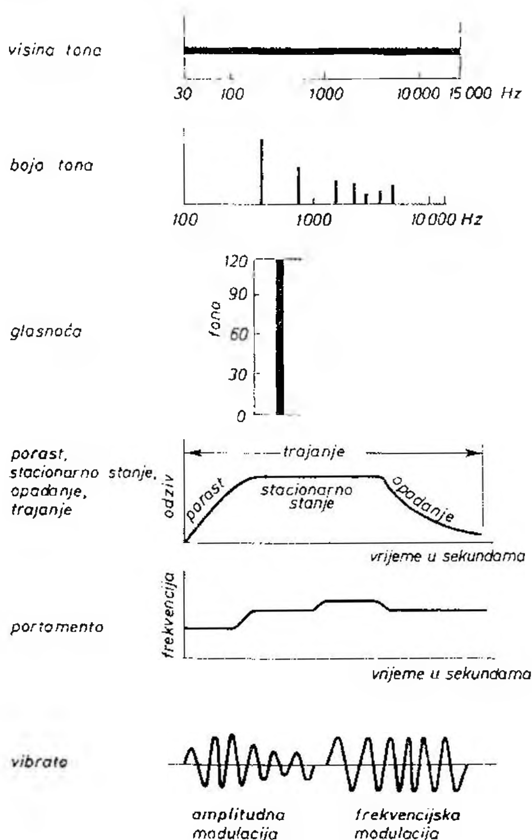
Sl. 3.12. Postotak zvučne snage koju sadržava govor u spektru ispod određene frekvencije

3.2. MUZIKA

Da bi mogao razumijevati i ocjenjivati glazbu, slušatelj mora imati osjećaj za *visinu tona*, za *glasnoću*, za *takt* i osjećaj za *boju tona*. Sve te četiri psihološke osobine zvuka pojavljuju se u kompleksnim muzičkim oblicima: u *harmoniji*, u *melodiji*, u *dinamici*, u *ritmu*, u *punoći* i *kvaliteti tona*. Bilo da se sluša živa ili reproducirana glazba, na te muzičke oblike utječe položaj zvučnog izvora lijevo-desno i položaj u dubinu, zatim akustička okolina, odjek i druge prostorne pojave.

3.2.1. Karakteristike muzičkog zvuka

Na sl. 3.13. dijagramima su prikazane karakteristike koje imaju ili mogu imati glazbeni tonovi. To su: *osnovna frekvencija* koja određuje tonsku visinu, *spektralni sastav* o kojem ovisi boja tona, *glasnoća*, vremenski tok intenziteta u kojem razlikujemo *početni tranzijent*, *stacionarno stanje* i *završni tranzijent*, zatim *portamento*, što znači kontinuiran prijelaz s tona jedne na ton druge frekvencije, te na kraju *tremolo* ili *vibrato*, kako se naziva amplitudna ili frekvencijska modulacija nekog tona.

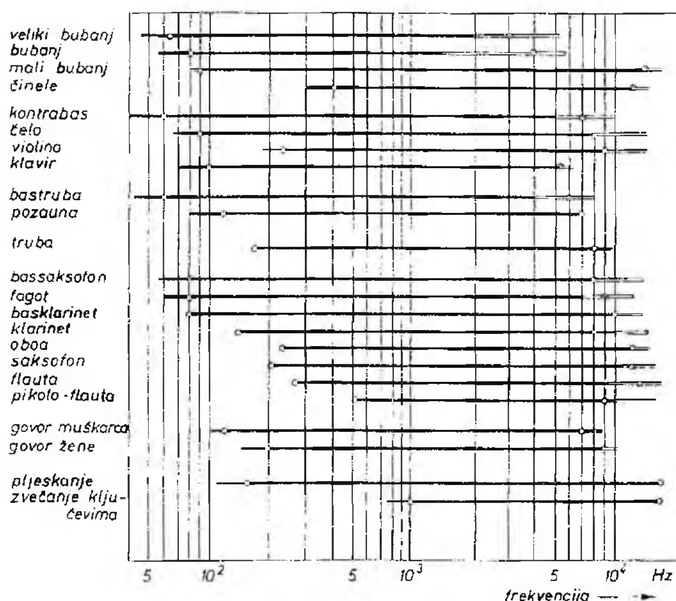


Sl. 3.13. Karakteristike muzičkih tonova

Vibrato je niskofrekvencijska modulacija muzičkog tona, a može biti frekvencijska ili kombinacija frekvencijske i amplitudne. Modulacijska je frekvencija najčešće oko 7 Hz. Vibrato samo sa amplitudnom modulacijom naziva se tremolo.

Opseg frekvencija zvuka što ga proizvode glazbeni instrumenti znatno je veći od onoga kod govora. Najniže osnovne tonove imaju: orgulje (16 Hz), kontrafagot (32 Hz), truba (40 Hz) i kontrabas (44 Hz). Ti su tonovi, međutim, slabiji nego njihovi niži harmonici jer je valna duljina pri tako niskim frekvencijama mnogo veća od tijela instrumenata pa je emitiranje slabo.

Na sl. 3.14. grafički je prikazan opseg frekvencija pojedinih glazbala. Nepocrnjeni nastavak nekih linija kontinuirani je spektar popratnih šumova koji nastaju klizanjem gudala, duhanjem u instrument itd. Kružićem su označene granične frekvencije, za koje je — prema ispitivanjima što ih je proveo *W. B. Snow* — 80% slušača moglo ustanoviti da nije riječ o punom, već o suženom opsegu. Kao što se vidi na slici, te su granice za zveket ključevima vrlo visoke.

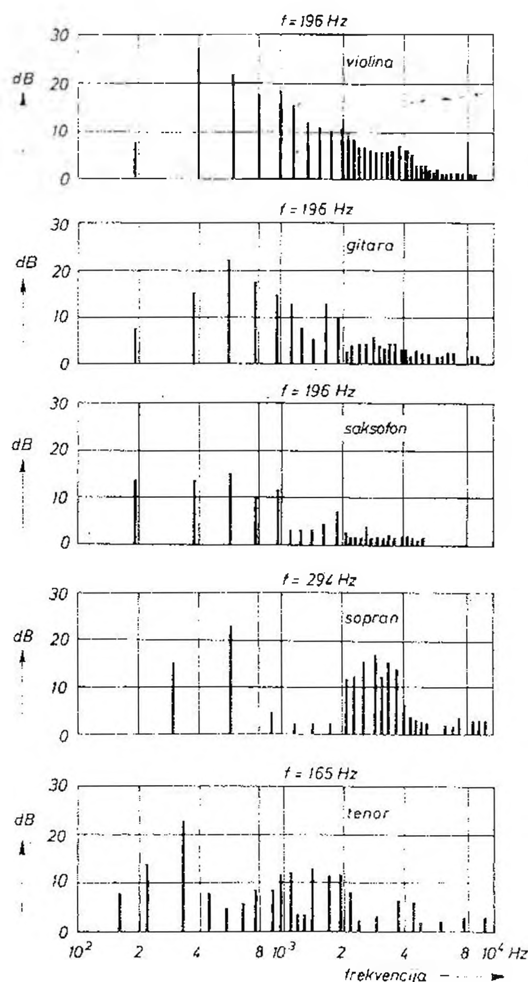


Sl. 3.14. Frekvencijski opseg muzičkih instrumenata, ljudskog glasa i nekih šumova. Nepocrnjeni nastavci linija označuju područje popratnih šumova. Propuštanje samo pojasa između kružnica osjetilo je 80% slušatelja.

Ton neke note svirane na jednom instrumentu razlikuje se od tona iste note proizvedene drukčijim instrumentom. Jedan od razloga za tu razliku jest različit spektralni sastav tih tonova. Na sl. 3.15. vide se spektralni dijagrami tona iste visine sviranoga različitim glazbalima. Na istoj su slici i spektralni dijagrami ljudskih glasova.

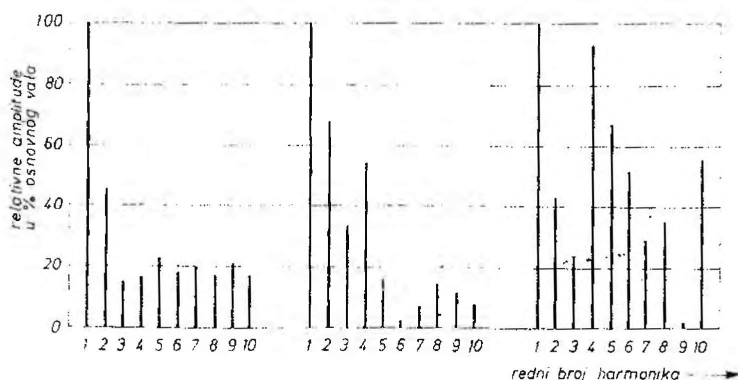
Prepoznavanje tona pojedinih instrumenata ovisi, međutim, manje o spektralnom sastavu, a više o tranzijentima. Ako se početni i završni tranzijenti tonova uklone, teško se može prepoznati kojem glazbalu pripada ton.

Spektralni sastav tonova ovisi i o glasnoći. Na sl. 3.16. vidi se kako ista nota svirana na istom glazbalu, ali različitom glasnoćom, ima različit međusoban odnos amplituda komponenata.

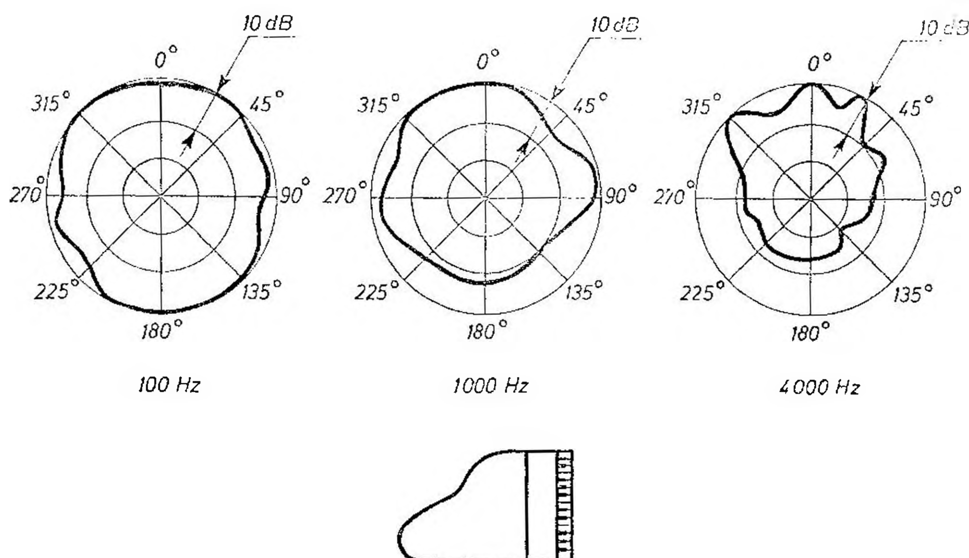


Sl. 3.15. Spektralni prikazi tonova nekih muzičkih instrumenata i ljudskih glasova

Ovisno o položaju slušatelja prema instrumentu mijenja se glasnoća i boja tona. Svako, naime, glazbalo ima na različitim frekvencijama razne usmjerne karakteristike. Na primjer, na sl. 3.17. usmjerne su karakteristike klavira za tri frekvencije: 100, 1 000 i 4 000 Hz. Na niskim frekvencijama intenzitet zvuka praktički je neovisan o kutu. Na visokim frekvencijama otvoren poklopac djeluje kao reflektor, te usmjeruje zvučne valove.



Sl. 3.16. Spektri istoga muzičkog tona uz tri različite glasnoće. Prvi dijagram odnosi se na sasvim tiho sviranje, drugi na glasnije, a treći na vrlo glasno.



Sl. 3.17. Usmjerni dijagram klavira za tri različite frekvencije

Muzički efekt neke skladbe ovisi o tonskoj visini izvedbe. U tome je osobito osjetljiv ljudski glas. Ako je tonska visina previsoka, treba za pjevanje uložiti veći napor, a i kvaliteta ne zadovoljava. Kod instrumenta muzički efekt ovisi o tome na koju je visinu tona on ugođen jer je skladatelj pisao glazbu za određenu tonsku visinu. To je naročito važno kad instrumenti sviraju skupno, pa ih zbog toga valja sve ugoditi na istu tonsku visinu. Problem je postao važan za radio-stanice, što je bio razlog da su one istaknule potrebu za međunarodnim dogovorom u vezi sa standardizacijom visine tona. To je konačno učinjeno 1939. godine na međunarodnoj konferenciji u Londonu, gdje je prihvaćen standard prema kojem ton a^1 ima frekvenciju od 440 Hz.

3.2.2. Dinamika

Pod *dinamikom* se razumijeva odnos amplituda na najglasnijim mjestima (fortissima) prema amplitudama na najtišim mjestima (pianissima) neke glazbene izvedbe. Taj odnos obično ne premašuje 65 dB. Samo izuzetno može doseći 70 dB, pa i više.

U govoru je dinamika znatno niža. Kod pojedinačnog govornika rijetko premaši 40 dB. Ako je, međutim, to veći broj ljudi, može imati i do 56 dB.

Mnogi istraživači nastojali su mjereći u koncertnim dvoranama ustanoviti koja razina glasnoće u fonima odgovara glasnoći naznačenoj u muzičkim partiturama. Najčešće se uzima tablica sastavljena prema ocjeni *Leopolda Stokowskoga* (tablica 3.3, prva dva stupca). Prema toj tablici vršna razina glasnoće orkestra je 95 fona. Ta se vrijednost odnosi na razinu glasnoće koja se čuje na dirigentovu mjestu. No ne može se reći da je to najbolje mjesto za slušanje.

Tablica 3.3.

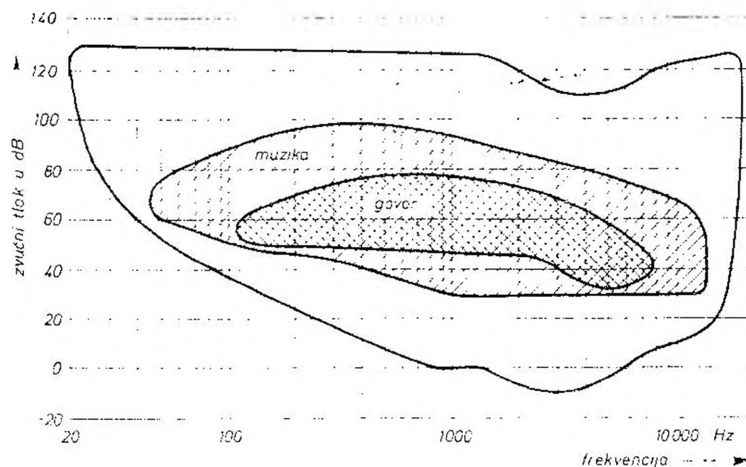
Muzička razina glasnoće	Foni	Decibeli
ppp	20	40
pp	40	50
p	55	60
mf	65	70
f	75	80
ff	85	90
fff	95	100

Prema *Somervilleu* i *Gilfordu*, koji su mjerenja proveli u pet koncertnih dvorana u Velikoj Britaniji, razlika između razine glasnoće na mjestu prednjih i one na mjestu stražnjih sjedala u dvoranama iznosi oko 8 dB, praktički neovisno o frekvenciji. Može se pretpostaviti da će za sredinu dvorana vrijediti razlika od 4

Tablica 3.4.

Izvor zvuka	Snaga u vatima
Orkestar od 75 izvođača	70
Veliki bubanj	25
Orgulje	13
Cimbali	10
Trombon	6
Klavir	0,4
Bas-saksofon	0,3
Bas-truba	0,2
Orkestar od 75 izvođača uz prosječnu glasnoću	0,09
Pikolo	0,08
Flauta	0,06
Klarinet	0,05
Francuski rog	0,05
Triangl	0,05
Glas bas	0,03
Glas alt pp	0,001
Violina na najtišim pasažima	0,000 003 8

dB. Budući da kratkotrajne (koje traju dio sekunde) vršne vrijednosti razine glasnoće mogu u prednjem dijelu dvorane doseći i do 105 dB, vršna će vrijednost u sredini dvorane iznositi 105 — 4 = 101 dB, dakle zaokruženo 100 dB. Ta se vrijednost nalazi u 3. stupcu tablice 3.3, a iznad nje su i vrijednosti za niže razine glasnoće.



Sl. 3.18. Plohe glazbe i govora u slušnoj plohi ljudskog sluha

Na sl. 3.18. označeno je unutar slušne plohe frekvencijsko i dinamičko područje glazbe i govora.

3.2.3. Zvučna snaga instrumenata

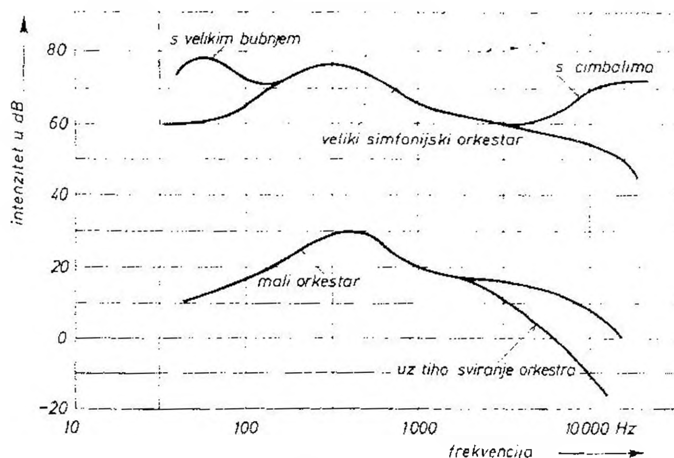
Zvučna snaga što je emitiraju glazbala vrlo je različita. Kao što se vidi iz tablice 3.4, ona se kreće u rasponu od nekoliko mikrovata (najtiši pasaži violine) pa do nekoliko desetaka vata (veliki bubanj). Podaci u tablici odnose se na maksimalnu glasnoću, ako u pojedinom slučaju nije navedeno drukčije.

Tablica 3.5.

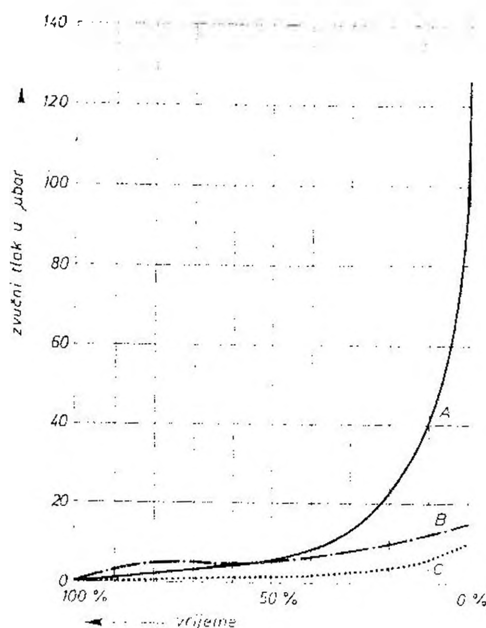
Izvor zvuka	Udaljenost u metrima	Glasnoća u fonima
Tiha violina s orkestrom	3	43
Pjevanje (najveća glasnoća)	1	92
Klavir (u prosjeku)	3	73
Klavir (najveća glasnoća)	3	100
Veliki bubanj (najveća glasnoća)	5	107
Orgulje (najveća glasnoća)	5	105
Orkestar od 75 ljudi (najveća glasnoća)	5	113

Bolji pregled odnosa instrumenata daje možda tablica 3.5. u kojoj su glasnoće. Budući da je glasnoća ovisna o udaljenosti od izvora zvuka, u tablici je za pojedini primjer naznačena i udaljenost.

U vezi s električkim uređajima važno je znati kako je snaga orkestra raspodijeljena po frekvenciji. Takav je dijagram na sl. 3.19.



Sl. 3.19. Frekvencijska karakteristika muzičke snage velikog i malog orkestra



U orkestralnim izvedbama nastupaju maksimalne zvučne snage vrlo rijetko, odnosno njihovo trajanje sasvim je kratko. To se vidi iz dijagrama na sl. 3.20. koji prikazuje vremensku raspodjelu zvučnog tlaka za različite vrste glazbe. Zvučna snaga plesne muzike vrlo je ujednačena jer, kao što se vidi, krivulja ne odstupa mnogo od horizontale. Dijagram također pokazuje da zvučni tlak simfonijske glazbe u 50% vremena ne premašuje 6% najveće vrijednosti.

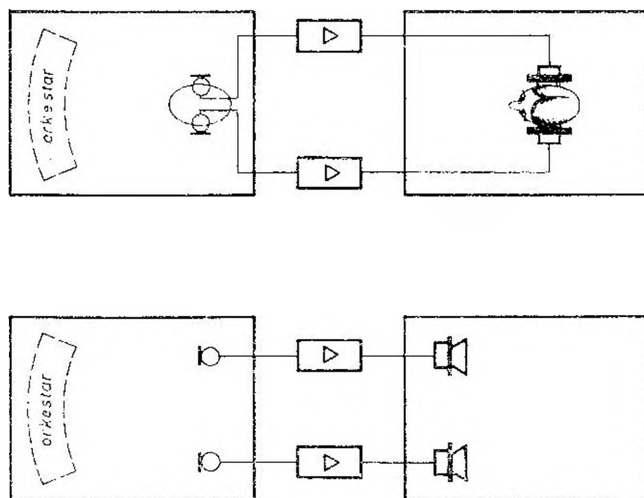
Sl. 3.20. Vremenska raspodjela zvučnog tlaka u različitim vrstama glazbe. (A) se odnosi na simfonijsku, (B) na plesnu, (C) na klavirsku glazbu.

3.2.4. Reprodukcija glazbe

Na visokokvalitetni elektroakustički uređaj pomoću kojeg se reproducira glazba postavljaju se ovi zahtjevi:

1. prenošeni frekvencijski pojas mora biti takav da bez prigušivanja propušta sve čujne komponente;
2. dinamički opseg mora biti dovoljno velik da se bez šuma i izobličenja prenesu svi zvučni intenziteti sadržani u skladbi;
3. prostorna raspodjela zvuka (auditorna perspektiva) kakva se pojavljuje u originalu mora biti sačuvana i u reprodukciji;
4. u pogledu akustičkoga prostornog ugođaja mora se reprodukcija približiti originalu.

Uz pomoć uređaja što ih danas pruža elektronika može emotivni doživljaj uvelike premašiti domet reprodukcije vjerne originalu. To su razni modifikatori boje tona, generatori vibrata i tremola, reverberatori itd., pomoću kojih se mijenja snimljena skladba. Bogatstvo mogućnosti na tom području i dobiveni subjektivni efekti ne daju više mjesta tvrdnji da je idealna reprodukcija ona koja je vjerna originalu.



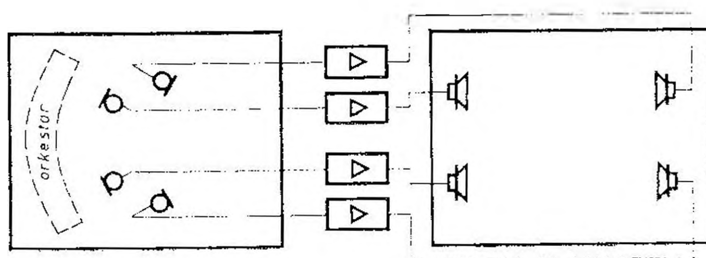
Sl. 3.21. Shema stereofonijskog prijenosa glazbe preko fantomske glave i slušalica (gore) i pomoću dvaju mikrofona i dvaju zvučnika (dolje)

Binauralnom slušanju originalne izvedbe uvelike se približava slušanje na osnovi *stereofonskog prijenosa* (sl. 3.21). Prednost takva postupka pred monofonskim treba pripisati povećanoj prirodnosti reproducirane izvedbe. Osjeća se prostorna raspodjela izvođača, što naročito dolazi do izražaja kad orkestar ne svira kao cjelina, tj. kad u skladbi izvedbu preuzimaju pojedini instrumenti ili skupina glazbala.

Originalni fortissimi orkestra od 105 do 110 fona zvuče impresivno i ne iritiraju jer se — u usporedbi s monofonskom reprodukcijom — znatno smanjuje neugodno stapanje zvukova. Općenito, stereofonska reprodukcija je transparentna, plastična, i smetnje, kao što su šum ili buka, manje su izražene.

H. Lauridsen (1954) je osjećaj prostornosti postigao obrtanjem faze zakašnjelog signala. Monofonski glazbeni signal reproduciran jednim magnetofonom privodio je slušalicama i glavi za snimanje drugog magnetofona. S glave za reprodukciju toga drugog magnetofona signal je sa zakašnjenjem od oko 50 ms privodio istim slušalicama, pa se je zakašnjeli signal superponirao prvotnom signalu. Uz istofaznost obaju signala, prvotnog i onog sa zakašnjenjem, nije u reprodukciji bilo bitne razlike prema normalnoj monofonskoj reprodukciji preko slušalica. Međutim, kad se zakašnjeli signal privodio jednoj od slušalica protufazno, pojavio se frapantan dojam prostornosti. Činilo se kao da zvuk dolazi sa svih strana, slušatelj se osjećao kao da se nalazi u sredini orkestra.

U Lauridsenovu se postupku osjećaj prostornosti dobiva time što se drugi signal čuje kao zakašnjela refleksija koja — dolazeći do pojedinog uha u protufazi — daje dojam kao da različite frekvencije imaju različito vrijeme pristizanja, pa prema tome kao da dolaze iz različitih smjerova. Taj efekt pripada području *pseudostereofonije*.



Sl. 3.22. Shema kvadrofonijskog prijenosa glazbe

Stereofoniji se može prigovoriti da zanemaruje akustički utjecaj dijela koncertne dvorane iza slušača. Stoga se iz tog prostora dvama dodatnim mikrofonima prenosi zvuk do dvaju zvučnika u stražnjem dijelu sobe (sl. 3.22). Takvu dopunu stereofonskoj reprodukciji slušač u svojoj sobi doživljava kao da su sva četiri zida nestala. K tome glazbu čuje sprijeda, a aplauz straga, kao da sjedi u jednome od prvih redova koncertne dvorane. Takav prijenos preko četiri kanala naziva se *kvadrofonija (tetrafonija)*.

Prvi pokusi sa stereofonskim prijenosom izvedeni su u filadelfijskoj Američkoj muzičkoj akademiji 1932. godine. Lutki u prirodnoj veličini čovjeka (nazvanoj *Oskar*) stavljeni su umjesto ušiju mikrofoni. Signali primljeni mikrofonima prenošeni su preko pojačala do slušalica, svaki kanal posebno. Druge su godine pokusi s takvom „fantomskom glavom" nastavljeni u *Bellovim laboratorijima* kako bi se proučavali problemi lokalizacije zvučnog izvora. Prvi stereofonski koncert izveo je 27. travnja 1933. filadelfijski orkestar Američke muzičke akademije. Izvedba je prenesena telefonskim kabelom iz Filadelfije do zvučnika u Ustavnoj dvorani u Washingtonu.

Zanimljivo je napomenuti da prilikom prijenosa preko „fantomske glave" do slušalica nije moguće razlikovati smjerove sprijeda i straga. Bio izvor zvuka ispred ili iza „fantomske glave", slušatelj ga uvijek lokalizira straga. Što je uzrok toj pojavi, nije otkriveno.

Glava četvrta

AKUSTIKA PROSTORIJA

4.1. UVOD

Znanost o akustici prostorija relativno je mlada. Prvo sistematsko istraživanje proveo je pri koncu prošlog i početkom ovog stoljeća američki fizičar *Wallace Clement Sabine*. Najvažniji njegov prilog toj znanosti je uvođenje *vremena odjeka* prostorije.

U proteklih je nekoliko desetaka godina zanimanje za akustiku prostorija uvelike poraslo. Akustička kvaliteta koja se dobiva prijenosom preko komunikacijskih sistema, kao što su radio, televizija, telefonija, kinematografija itd., umnogome ovisi o akustičkim osobinama prostorija iz kojih se prenosi ili se reproducira. Međutim, ne ističe se to samo u vezi s elektroakustičkim prijenosom. Danas su akustički principi sve više važni i pri projektiranju predavaonica, uredskih prostorija, bolnica, izložbenih prostora, hotela itd. Tome je jedan od razloga upotreba modernih građevnih materijala i opreme, koji manje apsorbiraju zvuk nego stari materijali. Zato je odjek često suviše velik, čime se pojačavaju buka i smetnje.

Zadatak je arhitektonske akustike da u prostorijama stvori uvjete za *dobro i ugodno slušanje*. Pri tome treba da bude zadovoljen *ne samo slušač nego i izvodilac*, tj. govornik ili muzičar. Dobra se akustika postiže zadovoljavajući ove uvjete:

1. u prostoriji ne smije biti buke, ni unutrašnje ni one koja dolazi izvana;
2. zvuk u prostoriji mora biti dovoljno glasan na svim mjestima;
3. u prostoriji ne smije biti jeke ili flater-jeke, ni na mjestu gdje su sjedala ni ondje gdje je postavljen mikrofon;
4. glasnoća zvuka mora biti približno posvud jednaka, što znači da na mjestima udaljenijima od izvora zvuka treba izravnom zvuku dodati onaj reflektiran od prikladno postavljenih ploha u prostoriji;
5. u prostoriji ne smiju nastati neželjene rezonancije;
6. odjek mora biti dovoljno malen da bi se izbjegla preklapanja uzastopnih zvukova (slogova i tonova) u govoru i muzici. Prostorija ipak treba da bude dovoljno „živa" na svim frekvencijama, kako bi slušanje govora ili glazbe bilo popraćeno ugodnim osjećajem. Pri tome direktan zvuk mora biti u stanovitom odnosu prema reflektiranome.

Teorijska razmatranja i mjerenja u izvedenim prostorijama pokazuju da optimalna duljina odjeka ovisi o veličini prostorije i o tome za koje se svrhe ona upotrebljava. Također je važan oblik prostorije jer on utječe na raspodjelu zvuka.

Ta tri činioca:

1. volumen
2. oblik
3. odjek (reverberacija),

određuju akustičke osobine prostorije, pa ćemo ih potanje opisati.

Zapisa o odjeku i apsorpciji može se naći već u djelima iz starog vijeka. *Lukrecije* opisuje efekt odjeka u stihovima: „Jedan glas ... rasprši se iznenada u mnogo glasova ... neki od njih udare o tvrde plohe i bivaju odbijeni natrag ..., Tako je cijela prostorija ispunjena glasovima ... sve okolo vrije i kipti od zvuka" ... Rimski arhitekt *Vitruvije* jedini je iz onog vremena koji se približio Sabineovim postavkama o uvjetima za dobro slušanje. Vitruvijeve upute prema kojima se dobivaju dobre akustičke osobine amfiteatara sadržavaju moderna gledišta, ali samo onda ako se interpretiraju na moderan način, što u njegovo vrijeme ljudima ne bi bilo razumljivo. *Aristotel* u djelu *Problemata* postavlja pitanje: „Ako se u kazalištu na prostoru za muzičare prostre slama, zašto zbor daje manje zvuka?" Odgovor na to dao je nakon dva tisućljeća *T. R. Smith*: „Ako u prostoriji ima previše rezonancije, uspješno se mogu upotrijebiti sagovi ili zastori da je smanje." Nijedno od pitanja, kao ni odgovori, nije išlo dalje od prešutnoga akustičkog savjeta dana u *Drugoj knjizi Mojsijevoj* (*Exodus* XXVI) prema kojemu propisana vodoravna duljina zastora od kozje dlake u šatoru zavjetnome osigurava da zastori vise s obilnim naborima koji apsorbiraju zvuk.

Kad je Sabine prihvatio ponuđeni posao, ustanovio je da je akustika prostorija najzanemarenija akustička grana. Tek sredinom 19. stoljeća pojavili su se autori koji su se počeli baviti tim područjem nauke o zvuku. Francuski je arhitekt *T. Lachéz* 1848. godine objavio svoju knjigu *L'acoustique et l'optique des salles de réunions*, koja je u popravljenom izdanju izišla 1879. godine. Bostonski fizičar *J. B. Upham* objavio je 1853. seriju članaka o problemu odjeka i pokazao da se on može smanjiti pomoću ovješenih zastora.

Joseph Henry, poznatiji kao otkrivač samoindukcije, napisao je 1856. godine raspravu *Acoustics Applied to Public Buildings*. On je eksperimentalno odredio koje se najkraće vrijeme reflektiranog zvuka smije dopustiti da bi se čula jasna jeka. Iz njegovih zapažanja zaključujemo kako je dobro poznavao osnovna načela refleksije zvuka. No u svim tim raspravama zvučne su pojave u prostorijama obuhvaćene samo kvalitativno. Sve što je o tome bilo napisano, sabrao je 1864. godine engleski arhitekt *T. R. Smith* u knjizi *The Acoustics of Public Buildings*.

Wallace Clement Sabine (1868—1919), po struci fizičar, u početku stručnog i znanstvenog rada zanima se za optiku i elektricitet, bez posebne sklonosti prema akustici. Akustikom prostorija počeo se baviti na nagovor predsjednika Vijeća Harvardskog sveučilišta, koji ga je 1895. godine zamolio da „nešto učini" u vezi s akustičkim teškoćama u upravo sagrađenoj sveučilišnoj predavaonici. Sabine je tom problemu prišao sa svom ozbiljnošću, proširivši svoja istraživanja na kazalište *Sanders Theatre*, koje je imalo izvrsna akustička svojstva, zatim na veliku predavaonicu *Jeffersonova fizikalnog laboratorija*, koja je bila osrednjih akustičkih osobina, i na podrumsku prostoriju tog laboratorija, gdje je vladala konstantna temperatura i Sabine ju je poslije upotrijebio kao odječnu komoru. Sabine se odlikovao sposobnošću da brzo uđe u srž problema. Već u početku istraživanja formulirao je potrebne i dovoljne uvjete za dobro slušanje. Uz pomoć nekoliko orguljnih svirala kao izvora zvuka, služeći se štopericom i svojim izvježbanim sluhom, Sabine je u spomenutim prostorijama izvodio prva mjerenja te vrste u povijesti akustike. Moderna tehnologija, moderni akustički materijali i akustičke konstrukcije omogućuju da se na vrijeme odjeka i izolaciju od buke mnogo lakše i pouzdanije utječe nego što je to mogao Sabine u svoje vrijeme. No ciljevi projektanata i konstruktora ostali su onakvi kako ih je formulirao taj učenjak.

Walace Clement Sabine je rezultatima svojih istraživanja utemeljio novu znanstvenu disciplinu — *akustiku prostorija*.

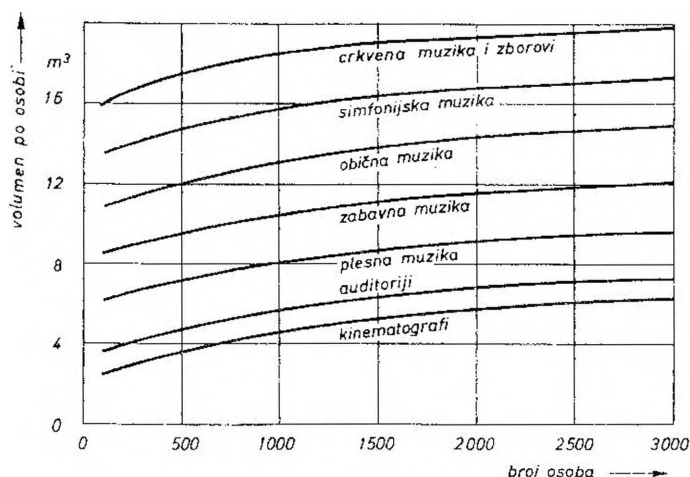
Tablica 4. 1.

Izvor zvuka	Maksimalni volumen dvorane u m^3
Prosječan govornik	3 000
Uvježban govornik	6 000
Instrumentalni ili vokalni solist	10 000
Veliki simfonijski orkestar	20 000
Veliki pjevački zbor	50 000

Svakom izvoru zvuka odgovara posve određen volumen do kojeg se može ići a da pri tome glasnoća ne postane premalena. Raste li volumen povećava se, naime, i unutarnja površina pa je i apsorpcija zvuka veća, odnosno uz jednaku emitiranu zvučnu energiju glasnoća je manja. U tablici 4.1. za neke su izvore zvuka orijentacijske vrijednosti volumena dobivene na temelju praktičkog iskustva.

Ako je potrebno ići iznad ovog volumena da bi se povećao broj sjedala, mora se u prostoriji instalirati razglasni uređaj.

Osnova po kojoj se određuje volumen koncertnih dvorana jest volumen po slušaocu, odnosno sjedalu. Minimalan specifični volumen po slušaocu je 6,5 m³. Manje od toga ne smije biti ako se želi postići akustička kvaliteta. Optimalan specifični volumen je 7—8 m³ po osobi. Za veće specifične volumene potrebno je, da bi se smanjio odjek, dodavati apsorpcijska sredstva. Dijagram na sl. 4.1. prikazuje ovisnost specifičnog volumena o broju slušalaca za razne vrste glazbe. Kao što se vidi, dijagram daje vrijednosti veće od spomenutih, no on vrijedi ako je vlastita apsorpcija prostorije u području srednjih frekvencija jednaka apsorpciji prisutnih slušalaca.

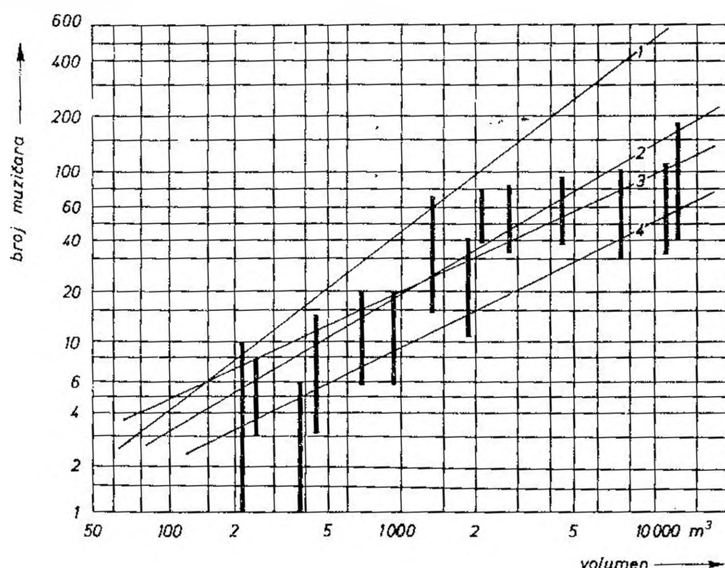


Sl. 4.1. Volumen po osobi (najniže vrijednosti) ovisno o broju osoba za različite vrste glazbe (prema Brüelu)

Optimalan je volumen koncertne dvorane između 10 000 i 15 000 m³. Može se ići i do 20 000 m³, ali tad nastaju teškoće prilikom solističkih izvedaba. Dobri rezultati mogu se postići i uz manje volumene, od 6 000 do 7 000 m³. Iz predočenih podataka o specifičnom volumenu i ukupnom volumenu prostorija izlazi da koncertna dvorana optimalnih akustičkih svojstava može primiti 1 600—1 700 slušalaca.

U glazbenim radio-studijima nema publike, pa volumen za isti orkestralni sastav može biti manji. Time se, doduše, povisuje razina glasnoće u usporedbi s koncertnom dvoranom, ali ne mnogo jer npr. upola manji volumen uz isti izvor daje razinu glasnoće veću za tri fona. Tu promjenu glasnoće čuju, međutim, samo

izvođači u studiju, a radio-slušalac može sebi glasnoću regulirati. Volumen studija ovisi o broju glazbenika i o vrsti muzike. U raznih autora nailazimo na različite podatke o odnosu broja muzičara prema volumenu studija, što se vidi iz dijagrama na sl. 4.2. Ti dijagrami vrijede za orkestralan sastav. Karakteristika 4 odnosi se na koncertne dvorane.



Sl. 4.2. Ovisnost broja izvođača o volumenu dvorane prema raznim autorima. Okomite podebljane dužine obuhvaćaju broj glazbenika u dvoranama kojima je akustička kvaliteta za muzičke izvedbe općenito priznata. 1 – Morris i Nixon, 1936; 2 – Braunmühl, 1934; 3 – Kirke i Howe, 1936; 4 – Watson, 1930.

Za kino-dvorane volumen po sjedalu kreće se između 3 i 4 m^3. Zbog tako malog volumena po osobi potrebno je osigurati dobru ventilaciju. Veći volumen bio bi štetan iz dva razloga: prvo, tad bi strop bio viši i zbog toga slabije iskorišten kao reflektor zvuka i, drugo, odjek bi bio suviše velik.

Za predavaonice uzima se 4 — 5 m^3 po sjedalu.

Prema istraživanjima *L. L. Beraneka* pogrešno je apsorpciju prostorija računati prema broju osoba. Da bi se mjereno vrijeme odjeka slagalo sa stvarnim, valja za osnovu proračuna uzeti *površinu auditorija*. Omjer između volumena (m^3) dvorane i površine (m^2) koju zauzimaju sjedala i izvođači automatski određuje maksimalno vrijeme odjeka. Uz pretpostavku da nisu upotrijebljeni apsorpcijski materijali, ili ih ima vrlo malo, uz omjer od 14 : 1 dobiva se vrijeme odjeka od 1,8 s, što odgovara koncertnim dvoranama. Ako je omjer 11 : 1, vrijeme je odjeka na području srednjih frekvencija 1,4 s, koliko zahtijeva operna glazba. Omjer 10 : 1 daje vrijeme odjeka od 1,3 s (na srednjim frekvencijama). Pokazalo se da je uz veći razmak između pojedinih sjedala apsorpcija gotovo dva puta veća nego što se prije mislilo. Na primjer, površina auditorija od 1 400 m^2 (zajedno s prolaznim hodnicima) ima jednaku apsorpciju sjedilo na toj površini 2 600 ili 2 200 osoba. U starijim dvoranama s volumenom od 20 000 m^3 može sjediti 2 600 osoba, a da je pri tome vrijeme odjeka dovoljno dugo. Novije dvorane, s udobnim sjedalima i primijenjenim mjerama sigurnosti, mogu uz jednak volumen primiti samo 2 200 slušalaca.

4.3. OBLIK

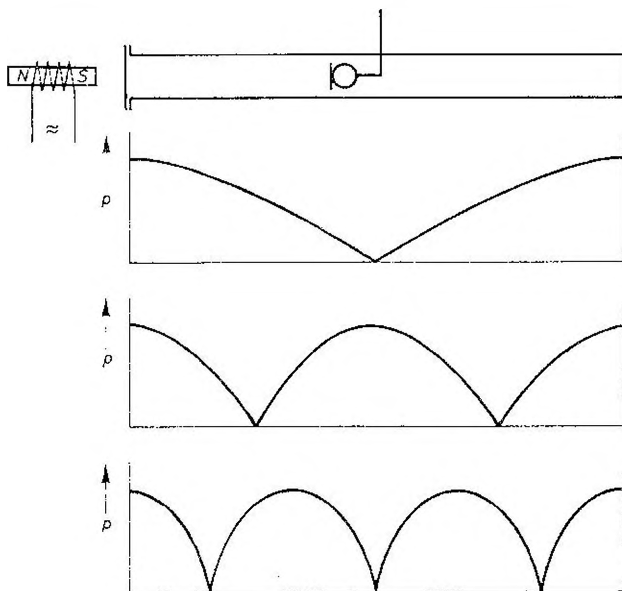
Akustička svojstva prostorije mnogo ovise o njezinu obliku. Stoga je potrebno unutarnjim plohama prostorije već dok se projektira dati ispravan oblik i položaj. Akustički nedostatak koji nastane zbog neprikladna oblika prostorije poslije je teško, a katkad i nemoguće ukloniti.

Prilikom akustičkog projektiranja treba pokloniti pažnju svakoj plohi prostorije. To se odnosi na pod i strop, na bočne stijene, na prednju i stražnju stijenu, na strop ispod balkona, pa čak i na manje plohe.

4.3.1. Zvučni proces u prostoriji paralelepipedna oblika

Prostorija paralelepipedna oblika složeni je rezonantni sistem. Zvučni proces koji se u takvom sistemu zbiva bit će nam razumljiviji ako izlaganje započnemo jednostavnim akustičkim rezonatorom, poznatim iz elementarne fizike.

Opisat ćemo pokus što ga je u nešto jednostavnijem obliku izveo *Kundt* još 1866. godine. Na jedan kraj cijevi, koja s druge strane ima čvrsto i glatko dno, stavljena je metalna membrana (sl. 4.3). Ispred membrane je elektromagnet s permanentnim magnetom napajan iz izvora tonskih frekvencija. Titranje membrane stvara u cijevi zvučne valove. Pomoću mikrofona koji se može pokretati uzduž cijevi mjeri se zvučni tlak na pojedinim mjestima. Na svasvim određenim frekvencijama nastaju zanimljive pojave. Mikrofonom se može ustanoviti da se zvučni tlak uzduž cijevi pravilno mijenja. Na nekim mjestima on je posve nizak, a ponegdje (na krajevima cijevi uvijek) maksimalne je vrijednosti. Riječ je o interferenciji između dva zvučna vala: onoga koji emitira membrana i onoga što se reflektira od dna cijevi. Rezultantni val je stojni, kojemu su stalno na istim mjestima točke



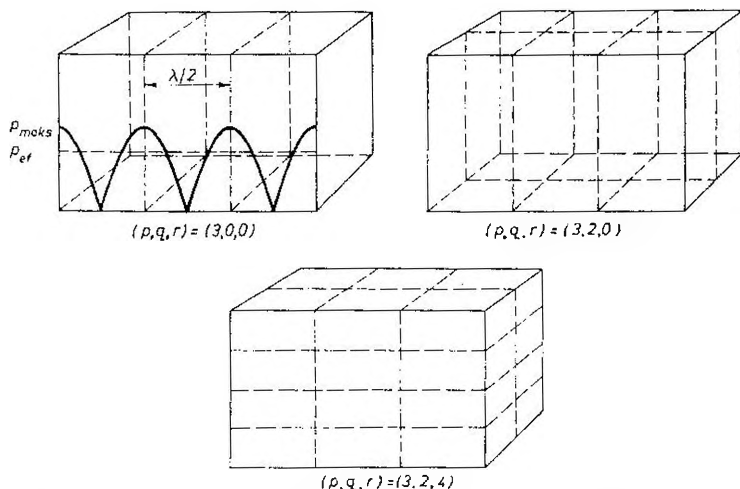
Sl. 4.3. Dijagram raspodjele zvučnog tlaka u stojnim valovima unutar cijevi

maksimalnog i minimalnog tlaka. Opisana pojava nastaje na onim frekvencijama na kojima je duljina prostora u cijevi jednaka cjelobrojnom višekratniku polovične valne duljine.

Ono što se događa u cijevi, nastaje i u prostoriji. Između svake dvije paralelne stijene neke prostorije, kad u njoj djeluje zvučni izvor emitirajući kompleksni ton, stvaraju se na određenim frekvencijama *stojni valovi*. Prostorija paralelepipedna oblika ima tri para paralelnih stijena, pa prema tome i tri sistema za stvaranje stojnih valova. Frekvencije na kojima će nastati stojni valovi, a koje se nazivaju *prirodnim* ili *vlastitim frekvencijama prostorije*, mogu se izračunati po formuli:

$$f = \frac{c}{2}\sqrt{\frac{p^2}{A^2} + \frac{q^2}{B^2} + \frac{r^2}{C^2}} \tag{4.1}$$

gdje su p, q i r cijeli brojevi ili nula (0, 1, 2, 3, . . .), a A, B i C su duljina, širina i visina prostorije. Na sl. 4.4. shematski je prikazano nekoliko načina titranja na vlastitim frekvencijama u paralelepipednoj prostoriji.



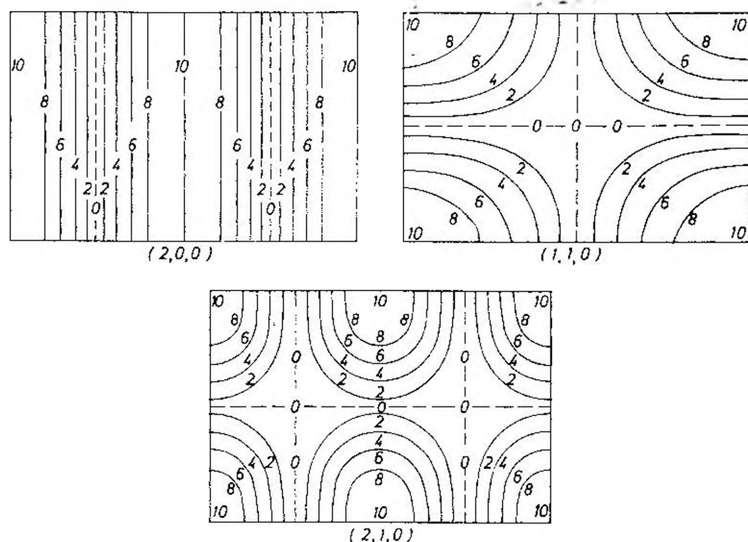
Sl. 4.4. Tri načina titranja na vlastitim frekvencijama paralelepipedne prostorije

Između stojnih valova pojedinih titrajnih sistema nastaje interferencija. Primjer raspodjele zvučnog tlaka u jednome takvom slučaju vidimo na sl. 4.5.

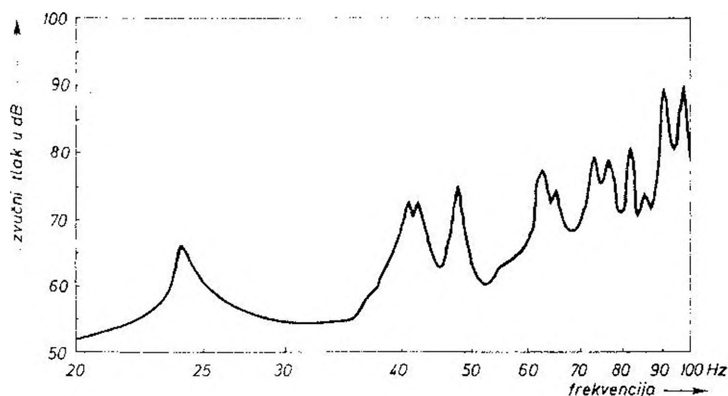
Zbog rezonantnih pojava — zbog stojnih valova — u prostoriji se, dakle, nejednoliko raspodjeljuje zvučni tlak. Pretpostavimo da imamo izvor zvuka koji bi na otvorenom prostoru u stanovitoj udaljenosti proizvodio konstantan zvučni tlak na svim frekvencijama. Stavimo li taj izvor zvuka u neku prostoriju, neće više zvučni tlak biti neovisan o frekveciji. On će na istoj udaljenosti od izvora biti na nekim frekvencijama znatno viši nego na otvorenom prostoru. To će se dogoditi na frekvencijama stojnih valova ili rezonantnim frekvencijama. Na sl. 4.6. dijagram prikazuje kako se u nekoj prostoriji mijenjao zvučni tlak ovisno o frekvenciji. Sobi je bila duljina 7,5 m, širina 4,4 m i visina 2,75 m. Dok se mjerilo, izvor je zvuka bio u jednom uglu sobe, a mjerač zvučnog tlaka u drugome.

Nejednolikost raspodjele zvučnog tlaka zbog rezonantnih pojava ima praktičko značenje samo u području nižih frekvencija. Tu je, naime, razmak između rezonantnih frekvencija velik, pa je rezultat vrlo nepovoljan. Broj rezonantnih frekvencija u području između frekvencije f i frekvencije $f + df$ može se približno izračunati po formuli:

$$dN = \frac{4\pi V f^2 \, df}{c^3} \tag{4.2}$$



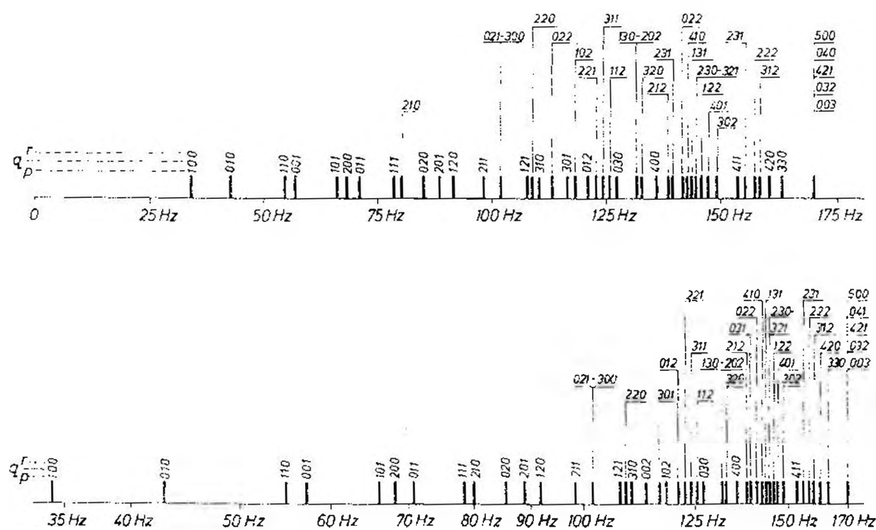
Sl. 4.5. Krivulje jednakoga zvučnog tlaka u prostoriji. Brojevi uz krivulje relativne su vrijednosti zvučnog tlaka.



Sl. 4.6. Frekvencijska ovisnost razine zvučnog tlaka u jednom uglu neke prostorije kad je zvučnik bio u drugom uglu.

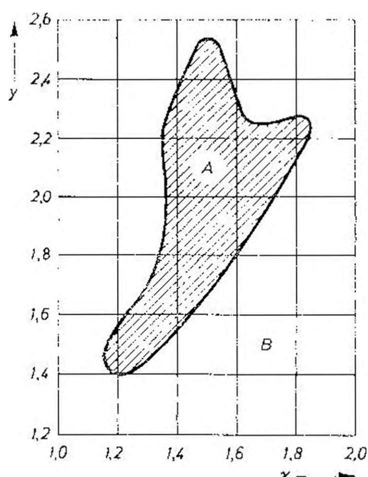
gdje je V volumen prostorije, a c brzina zvuka. Iz tog izraza dobiva se da na područje frekvencija između 50 i 100 Hz u prostoriji od 1 000 m^3 otpada 12,5 vlastitih frekvencija, a u prostoriji deset puta većeg volumena, dakle od 10 000 m^3, broj je vlastitih frekvencija u istome frekvencijskom pojasu također deset puta veći.

Prema višim frekvencijama postaje broj rezonantnih frekvencija općenito sve veći i razmak između njih sve manji, pa rezonantna pojava kao takva, osim što povećava glasnoću, nema drugo praktičko značenje. Na sl. 4.7. vidimo spektralni prikaz raspodjele rezonantnih frekvencija u prostoriji veličine 5 × 4 × 3 m.

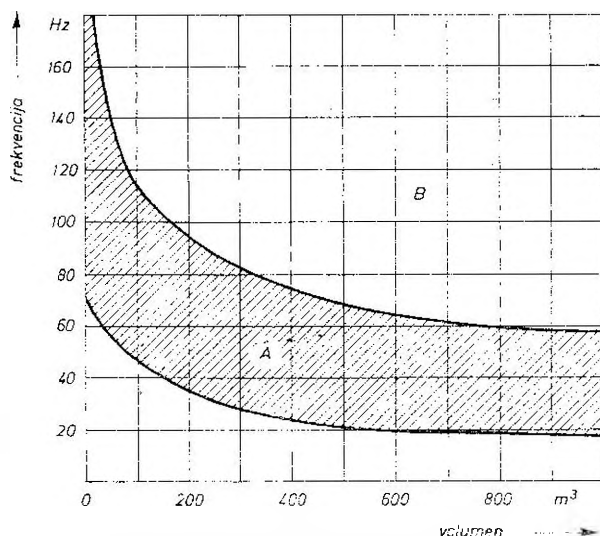


Sl. 4.7. Spektralni prikaz raspodjele rezonantnih frekvencija u prostoriji dimenzija 5 × 4 × 3 m. Na gornjem dijagramu skala frekvencija je linearna, a na donjemu logaritamska.

Da bi se dobila što povoljnija raspodjela zvučnog tlaka, moraju dimenzije prostorije biti u stanovitom odnosu. Najnepovoljniji oblik paralelepipedne prostorije je kocka. U takvoj su prostoriji rezonantne frekvencije svih triju sistema jednake, pa je porast tlaka na tim frekvencijama osobito velik. Povoljna oblika je ona prostorija u kojoj se rezonantne frekvencije pojedinih smjerova ne poklapaju. Prije se smatralo da takvu raspodjelu rezonantnih frekvencija daje točno određen omjer dimenzija prostorije. Najpoznatiji takvi omjeri su 2 : 3 : 5, $1 : \sqrt[3]{2} : \sqrt[3]{4}$, „zlatni rez" itd. Moderna valna akustika pokazala je da se ne mora držati nekih točnih pravila, već se dimenzije prostorije mogu kretati u dosta širokim granicama. Na sl. 4.8. prikazano je dijagramom koji odnosi dimenzija daju povoljnu, a koji nepovoljnu raspodjelu rezonantnih frekvencija u paralelepipednoj prostoriji. U dijagramu na sl. 4.9. označeno je frekvencijsko područje u kojem uz određene volumene vrijedi dijagram na sl. 4.8.



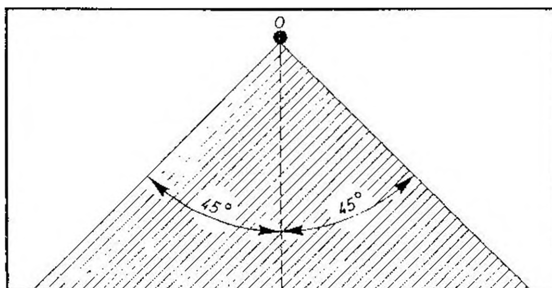
Sl. 4.8. Rezonantne frekvencije paralelepipedne prostorije s dimenzijama x × y × 1 : A povoljna, jednolika raspodjela, B — nepovoljna raspodjela pri kojoj se dvije ili više rezonantnih frekvencija preklapa



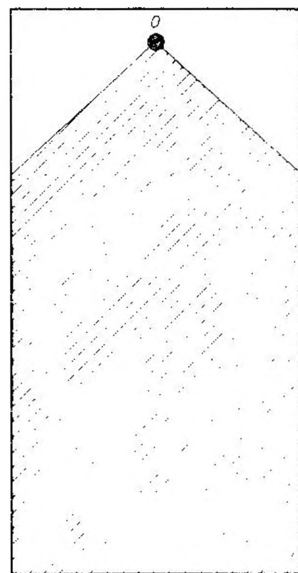
Sl. 4.9. Iscrtkana je ploha područje valjanosti dijagrama na sl. 4.8.

4.3.2. Plan poda

Jedan od najvažnijih zahtjeva u vezi s raspodjelom zvuka u nekoj prostoriji jest taj *da zvuk dolazi do slušaoca što kraćim putem.* U tom je pogledu prostorija koja ima tlocrt kao na sl. 4.10. povoljna oblika jer su zvučne zrake od govornika koji stoji na mjestu *O* do bilo kojega najudaljenijeg mjesta gotovo jednako duge. Ipak ta prostorija akustički ne odgovara. Valja, naime, računati i na usmjerenost ljudskoga glasa (a isto tako i zvuka glazbenih instrumenata) na visokim frekvencijama. Slušatelji treba da se nalaze unutar kuta od ± 45° ispred govornika. Kao što se vidi na sl. 4.10, velik dio prostorije ostaje izvan tog kuta. U akustičkom pogledu bolja je prostorija s tlocrtom na sl. 4.11. Omjer širine prema duljini 3 : 5 smatra se povoljnim za velike prostorije.

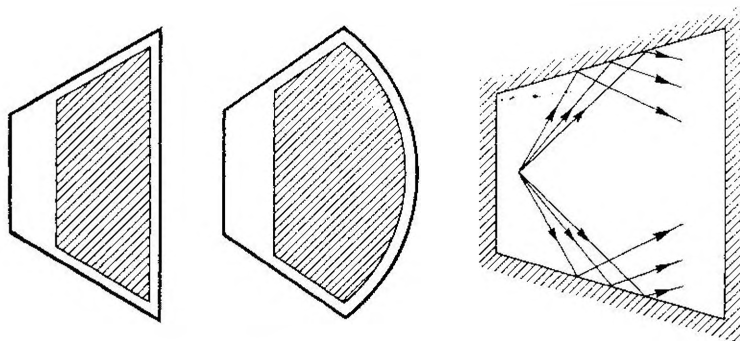


Sl. 4.10. Neispravno smještanje govornika prema slušaocima. Na mjestima izvan iscrtkane plohe slušaoci ne mogu govornika dobro čuti.

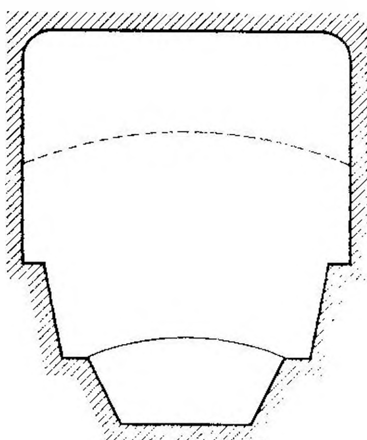


Sl. 4.11. Smještajući govornika uz užu stranu dvorane dobiva se dobro slušanje u cijeloj dvorani.

U vezi s usmjernim kutom i kratkim razmakom između govornika i slušalaca vrlo su povoljne prostorije trapezna ili lepezasta oblika. Uz takav tlocrt poda postaju bočne stijene dobar reflektor koji ravnomjerno reflektira zvuk po cijelom auditoriju (sl. 4.12). Nešto modificiran, također vrlo dobar lepezast oblik poda vidimo na sl. 4.13.



Sl. 4.12. Za auditorije vrlo je povoljan lepezast tlocrt dvorane.

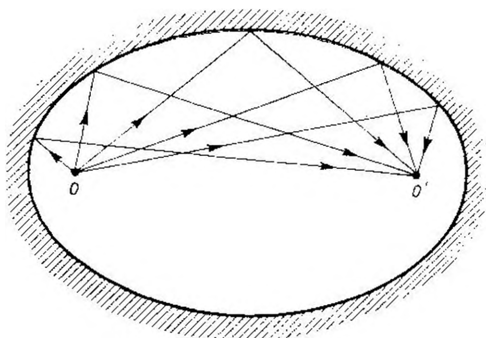


Sl. 4.13. Djelomično lepezast tlocrt dvorane daje također dobre rezultate.

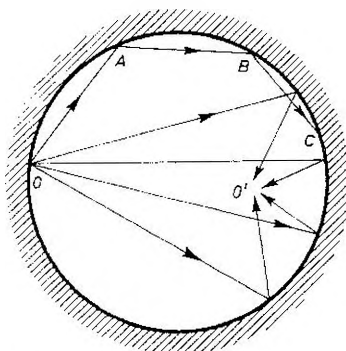
Okrugao i eliptičan pod unosi gotovo uvijek teškoće svojim efektom fokusiranja. Ako je izvor zvuka u jednom žarištu elipse, sve se zvučne zrake koncentriraju u drugom fokusu (sl. 4.14). Slična pojava nastaje i u okrugloj prostoriji (sl. 4.15*a*.). Zvuk koji dolazi od govornika iz točke *O*, poslije refleksije koncentrira se na mjestu *O'*. U okrugloj dvorani još je jedna zanimljiva pojava. Zvuk koji se od izvora širi u smjeru *A* odbija se na mjesto *B*, odatle na *C* itd., tj. klizi uz stijenu. Da bi se te pojave izbjegle, treba stijenama okrugle dvorane dati oblik kakav se vidi na sl.4.15.*b*.

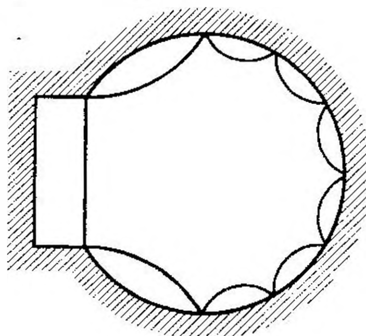
Nepovoljne refleksije mogu nastati i na zaokruženoj stražnjoj stijeni, što prikazuje sl. 4.16. Od glumca ili instrumenta koji je na pozornici na mjestu *O*, dolazi zvuk na stražnju svedenu stijenu i reflektira se koncentrirano prema mjestu *O'*.

Na sl. 4.17. neispravan je tlocrt pozornice. Prema mjestu govornika koji stoji u točki *O* odbijaju se od polukružne stijene sve zvučne zrake, zbog čega se govorniku čini da govori vrlo glasno, te nastoji govoriti tiše, što je nepovoljno za auditorij. Osim toga, govorniku smeta udaranje vlastitog glasa u uši. Svirač ili pjevač na mjestu *O* zbog povećane glasnoće nastojat će svirati ili pjevati tiše, kako bi uspostavio ravnotežu s ostalim instrumentima, odnosno pjevačima. Dakako da to vrijedi samo za njegovo mjesto, a ne za ostale lokacije na pozornici i u dvorani, pa se utišavanje ne smije provoditi. Dalje, zvučne zrake koje emitira izvor na mjestu *P* fokusiraju se na mjestu *P'*, zbog čega tu slušalac čuje zvuk glasnije nego što bi trebalo.



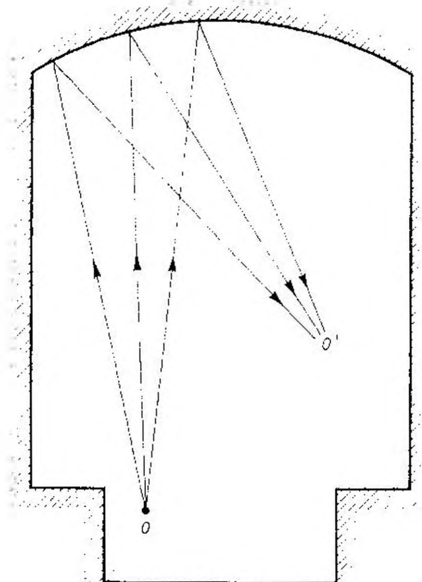
Sl. 4.14. Eliptičan tlocrt prostorije vrlo je nepovoljan, pogotovo ako je govornik u jednome od fokusa dvorane.



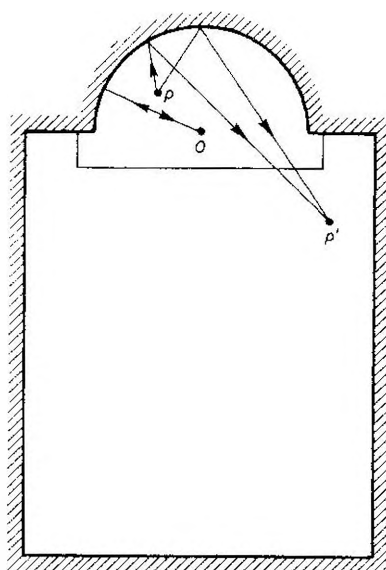


a) b)

Sl. 4.15. a) U dvorani s kružnim tlocrtom raspodjela zvuka nije jednolična. b) Akustičke osobine okrugle dvorane znatno se poboljšavaju stave li se difuzori na stijene.



Sl. 4.16. Konkavna stražnja stijena dvorane uzrokuje koncentraciju zvuka na jednom mjestu.



Sl. 4.17. Kružna stražnja stijena pozornice uzrokuje nepovoljnu raspodjelu zvuka na pozornici i u gledalištu.

4.3.3. Izdizanje izvora zvuka i sjedala

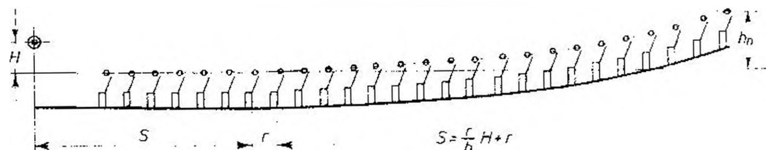
Prelazeći preko glava i tijela slušalaca zvuk prilično oslabi, tako da na stražnjim sjedalima glasnoća nije dovoljna. Izdizanjem izvora zvuka iznad ravnine u kojoj su glave slušalaca osigurava se izravnom zvuku slobodan put i time postiže razumljivost govora i na stražnjim sjedalima većih dvorana. Ako udaljenost posljednjeg sjedala od izvora označimo sa S, visinu izvora iznad glava sa H, razmak među redovima sa r, a slobodnu visinu glave slušaoca u posljednjem redu sa h, potrebnu visinu izvora zvuka iznad glava izračunavamo po formuli:

$$H = h \frac{S - r}{r} \tag{4.3}$$

Da slušanje bude dobro, h mora iznositi barem 12 cm (vidi sl. 4.20). Može se ići i do 8 cm, no tad moraju susjedni redovi biti međusobno pomaknuti u bočnom smjeru za pola sjedala. Normalna visina glave od poda u sjedećem položaju uzima se da je 1,2 m, a razmak između redova obično iznosi 0,85 m.

Ako je broj redova velik, ne može se izvesti ravan pod jer bi izvor zvuka trebalo suviše izdignuti iznad glava slušalaca na prvim sjedalima. Tad se prednji redovi postave na ravnom podu, a ostali na uzdignutom dijelu, kao na sl. 4.18. Izdizanje h_n u n-tom redu iznad ravnine glava slušatelja na vodoravnom dijelu dobiva se iz formule:

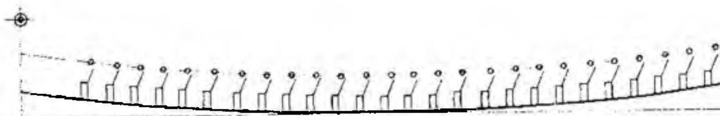
$$h_n = h_{n-1} + h - \frac{r \cdot (H - h_{n-1})}{S + (n - 1) \cdot r} \tag{4.4}$$



Sl. 4.18. Postupno izdignuta sjedala omogućuju slušanje izravnog zvuka i u stražnjem dijelu dvorane.

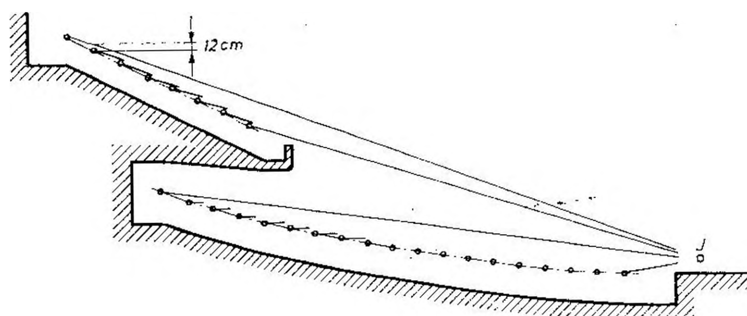
gdje su h_1, h_2, h_3 do h_n povišenje prvog, drugog, trećeg, odnosno n-tog reda, a S je razmak od izvora zvuka do posljednjeg reda u horizontalnom dijelu dvorane.

Na sl. 4.19. oblik je poda koji u prednjem dijelu nije vodoravan, već uzdignut. Time se postiže manje izdizanje stražnjeg dijela. Takav se profil poda mnogo upotrebljava u kino-dvoranama.



Sl. 4.19. Izdignuta prednja i stražnja sjedala omogućuju dobru akustičku vezu između izvora zvuka i svakog slušatelja a da pri tome izdizanje nije veliko.

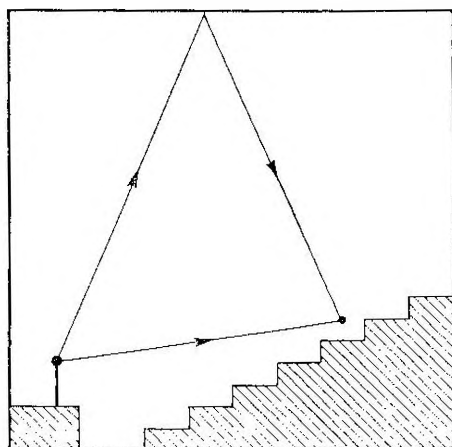
Sjedala na balkonu moraju biti izdignuta prema istim principima (sl. 4.20).



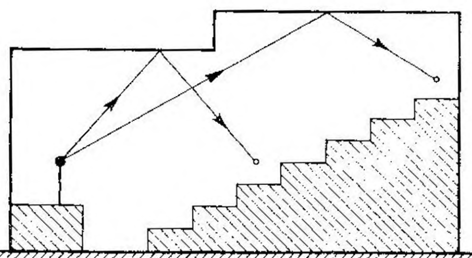
Sl. 4.20. Sjedala na balkonu valja izdignuti na način sličan onome u donjem dijelu dvorane.

4.3.4. Visina i oblik stropa

U dobro projektiranoj dvorani strop je ploha koja više nego ijedna druga pridonosi pojačavanju zvuka. Budući da su u pogledu glasnoće najlošija stražnja sjedala, strop treba da najviše reflektira zvuk upravo u tom smjeru. Pri tome mora biti zadovoljeno ovo važno pravilo: da ne bi došlo do nerazumljivosti govora, ili čak jeke, *ne smije reflektirani zvuk doći suviše kasno nakon direktnog zvuka*. Razlika između puta koji će prevaliti izravni i reflektirani zvuk treba da bude do 12 m. Iz toga izlazi da strop ne smije biti suviše visok. Na sl. 4.21. vidi se kako tad jedan zvuk previše kasni za drugim. Spuštajući strop ili, još bolje, ako je on stepeničasta oblika (sl. 4.22), postiže se ispravna refleksija zvuka prema stražnjim sjedalima.

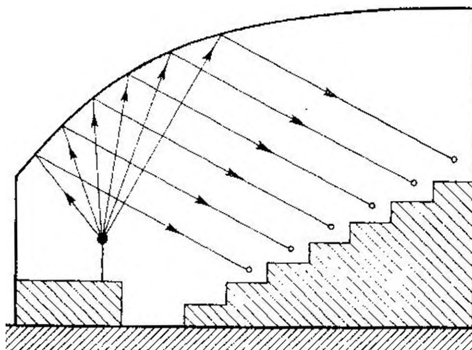


Sl. 4.21. Zbog refleksija na suviše visokom stropu može se pojaviti jeka.

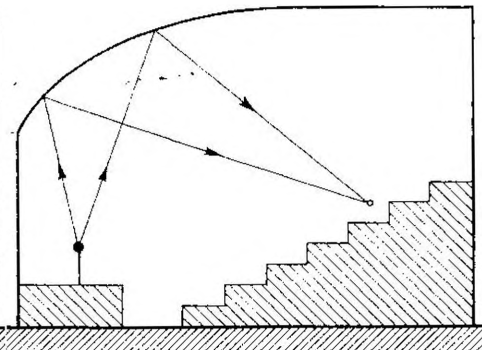


Sl. 4.22. Stepeničastim stropom dadu se zvučne zrake ispravno usmjeriti prema slušaocima.

Još je povoljnije stropu dati zakrivljen oblik, kao na sl. 4.23. jer se tad sve zvučne zrake koje stižu na strop vraćaju prema auditoriju. Treba upozoriti da svaki zakrivljen strop ne daje dobar rezultat. Sl. 4.24. prikazuje primjer u kojem je zakrivljenost neispravna i djeluje štetno jer koncentrira zvuk u srednji dio dvorane.

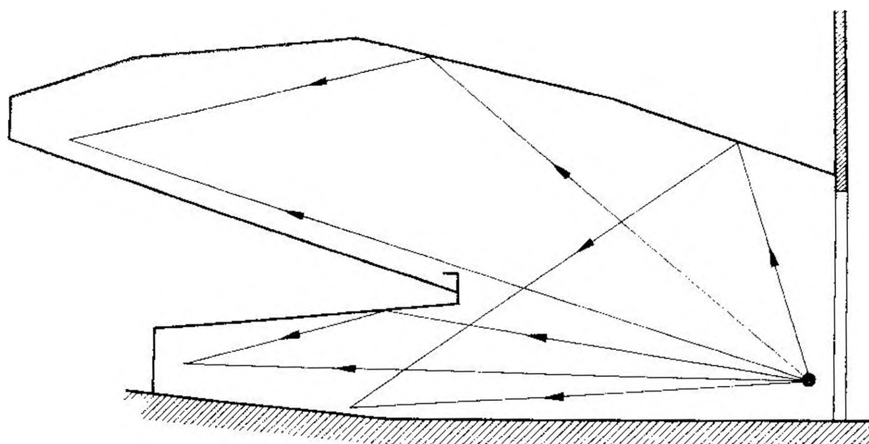


Sl. 4.23. Ispravno zakrivljen konkavni strop može se dobro iskoristiti kao reflektor zvuka.



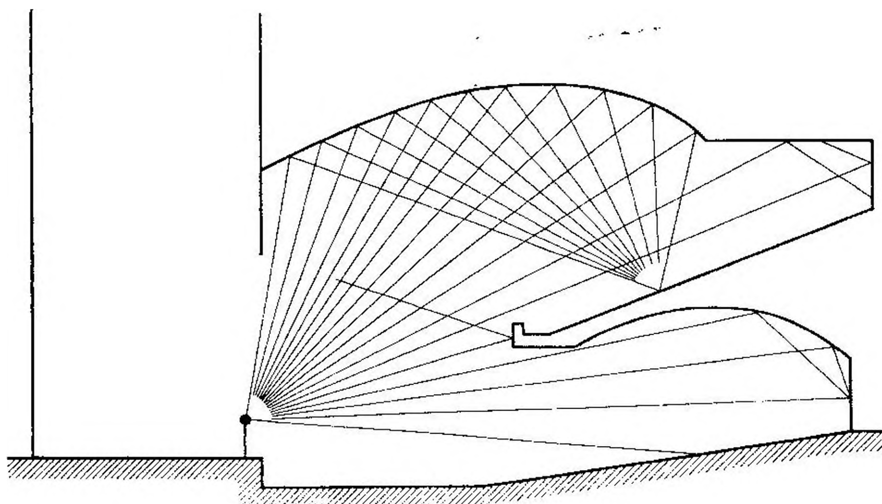
Sl. 4.24. Konkavan strop s neispravnim zakrivljenjem uzrokuje koncentriranje zvuka na jednom mjestu.

Na sl. 4.25. presjek je dobro projektiranog kazališta. Stropu ispred pozornice dan je takav položaj i oblik da se zvuk odbija u prostor ispod balkona. Ostali dio stropa usmjeruje zvuk na balkon. I stropu ispod balkona dan je takav nagib da odbijeni zvuk dospijeva na stražnja sjedala parketa.

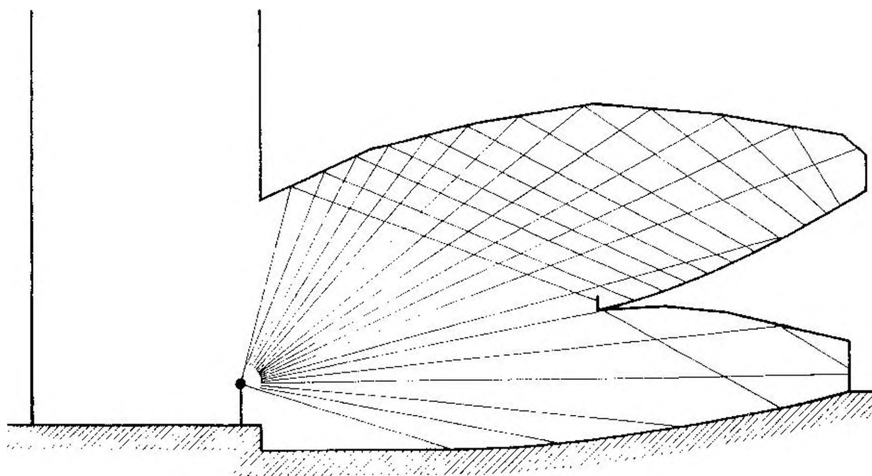


Sl. 4.25. Svaku plohu stropa, pa i onoga ispod balkona, valja upotrijebiti kao reflektor zvuka.

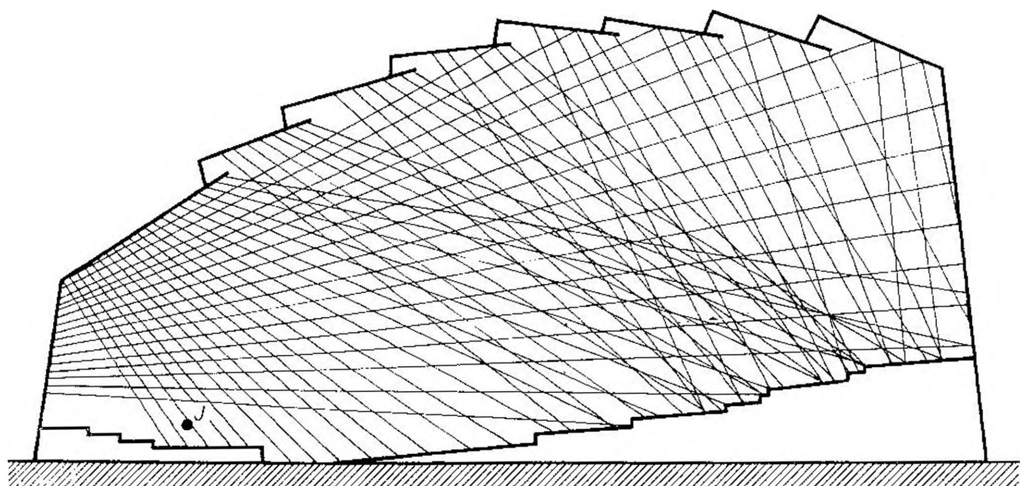
Stara kazališta gradila su se s kupolastim stropom iznad gledališta. Kao što se vidi iz sl. 4.26, to dovodi do vrlo nepovoljne raspodjele zvuka jer se on koncentrira na jedno usko mjesto. Osim toga refleksije ispod balkona nisu uopće iskorištene. Takvo se kazalište može pregradnjom popraviti na taj način da glavni strop i strop ispod balkona bude oblika kao na sl. 4.27. Ispravno oblikovan strop se može izvesti i tako da se podijeli u sekcije kao na sl. 4.28.



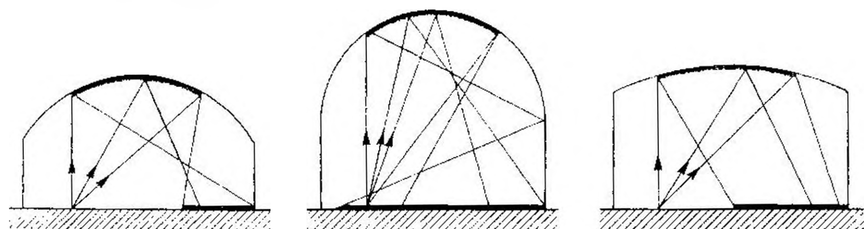
Sl. 4.26. Stara su se kazališta gradila s konkavnim stropom. Stoga je raspodjela zvuka u dvorani bila vrlo nepovoljna.



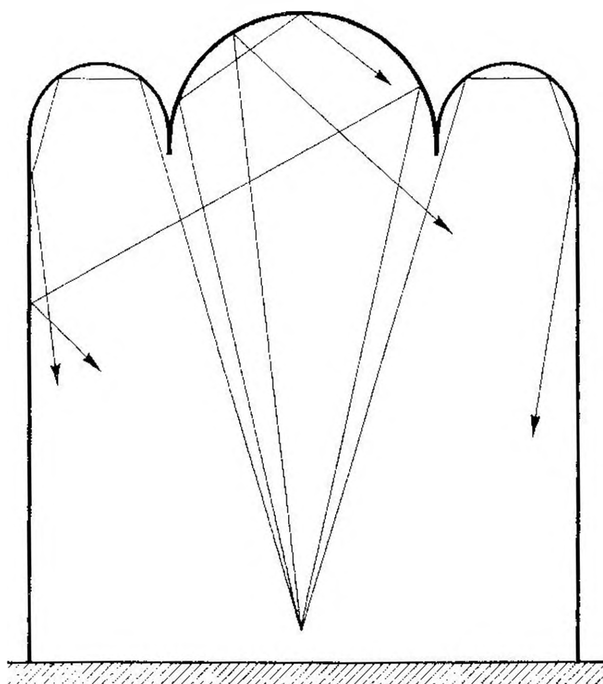
Sl. 4.27. Primjer koji pokazuje kako se u kazališnoj dvorani na sl. 4.26. može pregradnjom postići vrlo dobro slušanje.



Sl. 4.28. Često se strop kao reflektor izvodi podijeljen na sektore. Mrtvi kutovi sektora mogu poslužiti za smještanje rasvjetnih tijela.



Sl. 4.29. Ovisno o odnosu radijusa zakrivljenja stropa prema njegovoj visini, može raspodjela zvuka na podu biti povoljna i nepovoljna.



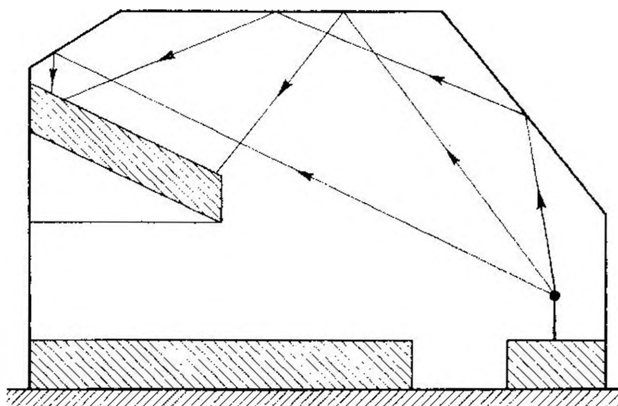
Pravokutnih dvorana ima sa stropom bačvasta oblika. Na sl. 4.29. tri su presjeka dvorana te vrste. Prvoj je polumjer zakrivljenja jednak visini, drugoj iznosi pola visine, a trećoj je jednak dvostrukoj visini dvorane. Kao što se vidi na slici, najnepovoljnija je prva izvedba. Prema tome, ako zbog nekih razloga strop mora biti sveden, treba da mu je polumjer manji od polovice visine ili veći od dvostruke visine.

Višestruki visoki svodovi djeluju također difuzno, što se uočava na sl. 4.30.

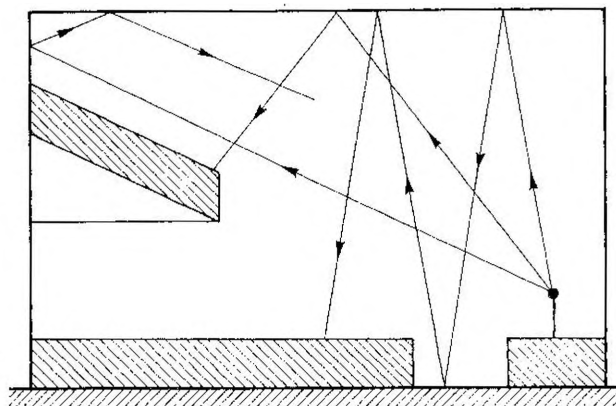
Sl. 4.30. Višestruki visoki zakrivljeni stropovi raspršuju zvučne zrake.

4.3.5. Reflektori zvuka

Zvuk se na stražnjim sjedalima može pojačati tako da se neposredno uz izvor stavi posebna reflektorska ploha. Primjer je takva reflektora na sl. 4.31. Bez njega ne samo da bi zvuk koji strmo odlazi prema stropu bio neiskorišten, već bi postao i štetan. Kao što se vidi na sl. 4.32, taj se zvuk višestruko odbija te do slušalaca dolazi mnogo kasnije nego izravan zvuk, što pogoršava razumljivost govora. Da bi se iskoristio i zvuk koji prispijeva na stražnju stijenu iznad balkona, ta je stijena na sl. 4.31. djelomično nagnuta, i time također iskorištena kao reflektor za sjedala na balkonu.



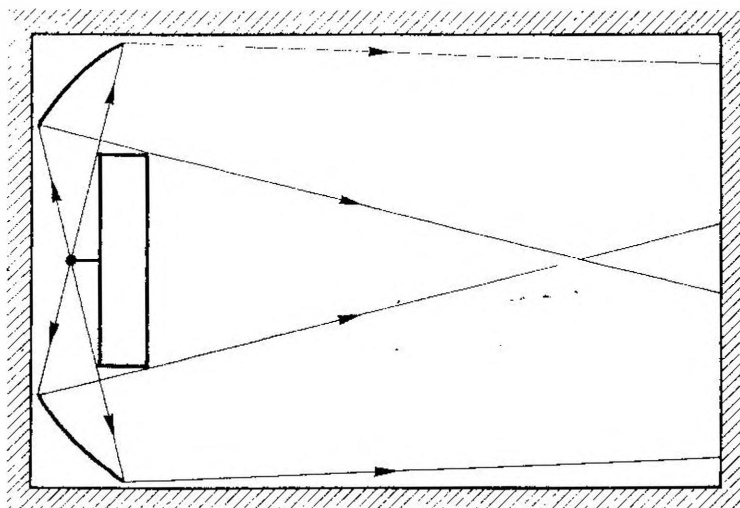
Sl. 4.31. Prednjem i stražnjem dijelu stropa valja dati takav nagib da se zvuk reflektira prema slušaocima.



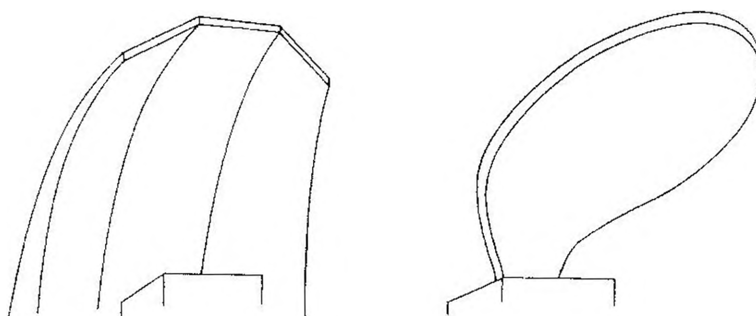
Sl. 4.32. Refleksije zvuka od ravnog stropa ponekad su štetne.

Reflektori mogu vrlo dobro djelovati ako su smješteni bočno, kao na sl. 4.33. Svaki od njih pri tome odbija zvuk u svoju polovicu dvorane i tako pridonosi da se poveća glasnoća.

U velikim dvoranama mogu biti uspješni reflektori kakve vidimo na sl. 4.34. Oni imaju dvostruk zadatak: reflektiraju zvuk prema slušaocima i sprečavaju njegov odlazak prema visokom stropu, kako ne bi nastala jeka.

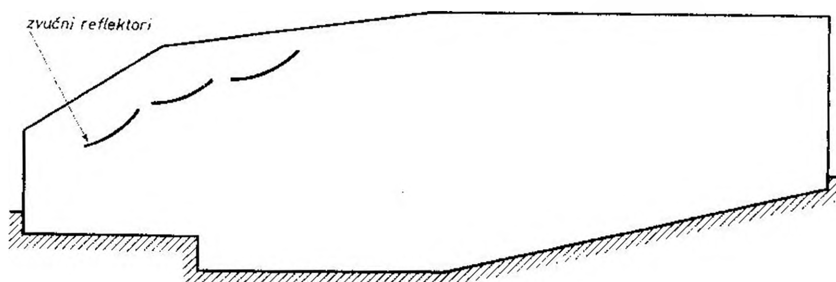


Sl. 4.33. Bočni reflektori usmjeruju zvuk prema slušateljima.



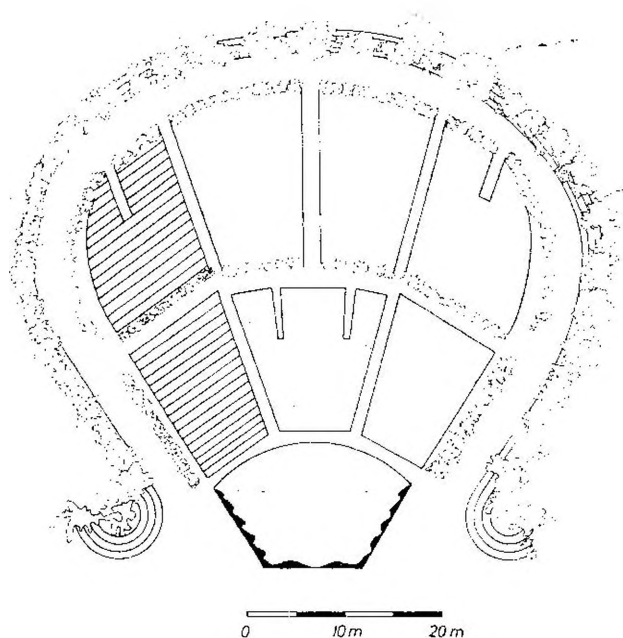
Sl. 4.34. Reflektori zvuka iznad govornika

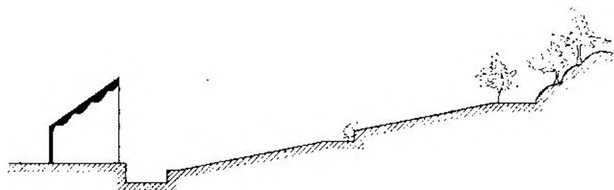
I u koncertnim dvoranama potrebni su reflektori. Budući da je njihov strop relativno visok, reflektori su obješeni iznad orkestra, kao na sl. 4.35. Zadatak im je da pridonesu pravilnoj raspodjeli zvuka po dvorani.



Sl. 4.35. Ovješeni reflektori u velikim koncertnim dvoranama

Vrlo važnu ulogu imaju reflektori na ljetnim pozornicama. Budući da je auditorij vrlo velik, a nema stropa, problem glasnoće na udaljenim mjestima nije lako riješiti. Pomoću reflektora oblika kakav je na sl. 4.36. može se postići razumljivost govora i za nekoliko tisuća slušalaca, uz uvjet da nema vjetra ni buke. Još je u jednom pogledu važna uloga takvih reflektora na otvorenim mjestima: oni omogućuju da se prilikom glazbenih izvedbi muzičari međusobno dobro čuju.



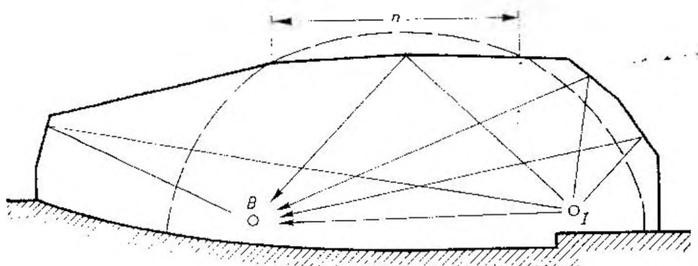


Sl. 4.36. Pozornica na otvorenom prostoru s reflektorom zvuka

4.3.6. Jeka i flater-jeka

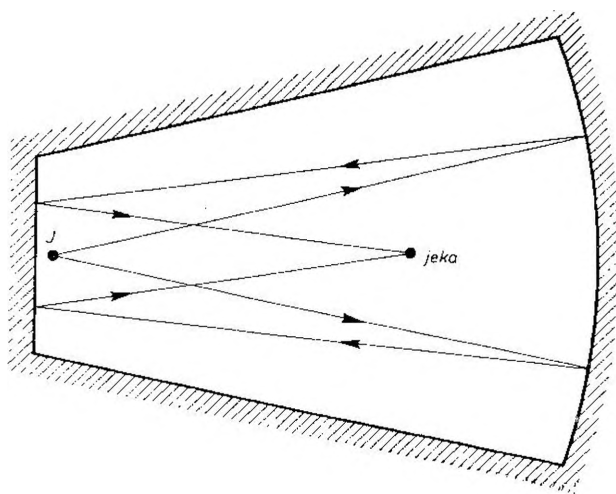
Zvučne impulse koji jedan poslije drugoga slijede u vremenu duljemu od 0,05 do 0,1 s uho čuje svaki posebno. Pojava da se zvučni impuls ponovno čuje pošto se odbije od neke plohe naziva se *jekom*. Uz zakašnjenje reflektiranog zvuka prema izravnome od 0,05 s, što odgovara razlici putova od 17 m, jeka se čuje onda ako je odbijeni zvuk istog intenziteta kao i direktni. Vrijeme zakašnjenja od 0,1 s (razlika u putu od 34 m) odnosi se na primjer kad je intenzitet reflektiranog zvuka upola slabiji od onoga u izravnog zvuka.

Jeka uz to što je slušanju neugodna otežava i razumijevanje govora. Rečeno je već da jeka nastaje u prostorijama s visokim stropom. No ona se pojavljuje i u suviše dugoj prostoriji. Na sl. 4.37, koja prikazuje presjek velike dvorane, vidi se kako na mjestu slušaoca *B* jeke neće biti samo od odraza na stropu unutar crtkane elipse na dijelu označenome sa *n*. Reflektiranje od ostalih ploha daje suviše veliku razliku između puta izravnog i reflektiranog zvuka pa se čuje jeka.



Sl. 4.37. U velikim se dvoranama zbog refleksije od nekih ploha može pojaviti jeka.

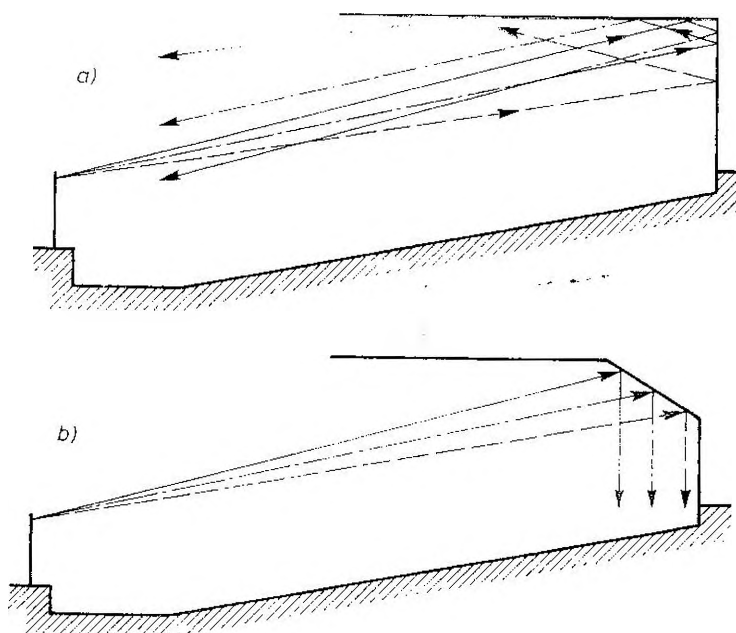
Jeka se može pojaviti i u relativno malim prostorijama zbog višestruke refleksije. Takav je primjer na sl. 4.38. Tu je polumjer zakrivljenja stražnje stijene velik pa se zvuk ne može koncentrirati, ali zato, kao što vidimo, ima mogućnosti da se na nekim mjestima u dvorani pojavi jeka.



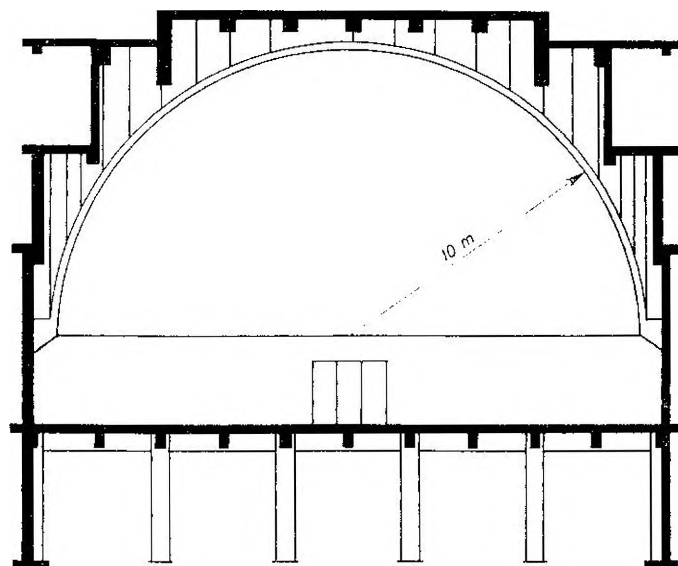
Sl. 4.38. Jeka može nastati i zbog višestruke refleksije.

Sl. 4.39. prikazuje kako može nastati jeka na kazališnoj pozornici. Refleksijom od stražnje stijene balkona i stropa nad balkonom vraća se zvuk na mjesto odakle je pošao. Jednostavnim skošenjem stropa iznad balkona, kao na donjoj slici, može se taj štetni zvuk pretvoriti u korisni.

Dat ćemo primjer gdje je za uklanjanje jeke bilo potrebno primijeniti specijalne mjere. To je planetarij (sl. 4.40). Jeka je prigušena tako da je kupola izvedena od perforiranih ploča, a u prostor iznad njih stavljen je materijal koji upija zvuk.

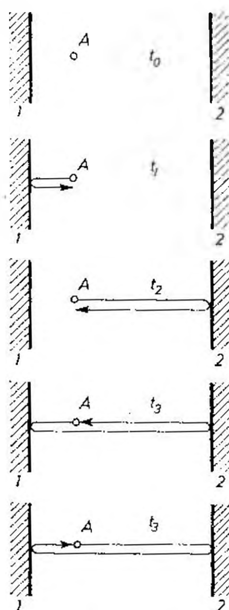


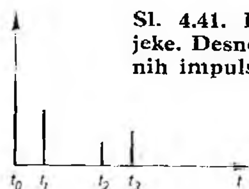
Sl. 4.39. Loše oblikovan stražnji dio stropa ponekad uzrokuje jeku. Nakon skošenja tog dijela stropa nje nestaje.



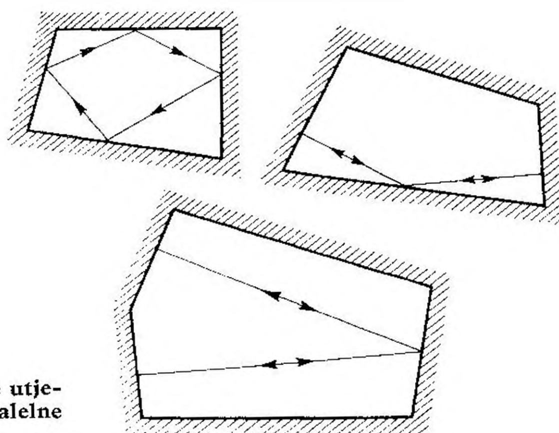
Sl. 4.40. Planetarij ima kuglast strop s velikim radijusom. Da bi se izbjegla jeka treba iznad perforiranih stropnih ploča staviti apsorpcijske materijale.

U manjim prostorijama glatkih i tvrdih stijena često ćemo naići na pojavu da se npr. pljesak dlanovima čuje kao niz brzih uzastopnih impulsa. To je takozvana *flater-jeka* (eng. flutter — lepršati). Sl. 4.41. prikazuje nastanak te pojave. Impuls proizveden na mjestu A odbije se od stijene 1 nakon vremena t_1 natrag do slušaoca. To se isto događa s impulsom koji se reflektira od stijene 2, samo nakon vremena t_2. Poslije toga oba reflektirana zvuka putuju od suprotnih stijena i stižu u točku A nakon istog vremena t_3. Dalji tok u biti je ponavljanje dotadašnjega sve dok se zvuk ne priguši. *Lepršava jeka* može nastati i između ploha koje nisu paralelne. To predočuje sl. 4.42. I kod valovitog stropa, kao na sl. 4.43, može nastati lepršava jeka. Stoga je bolje strop nazubiti kako je to učinjeno na sl. 4.44.

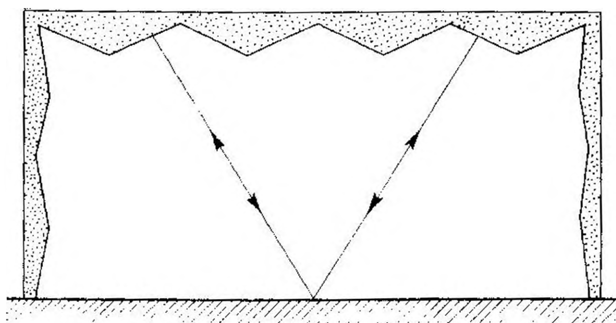




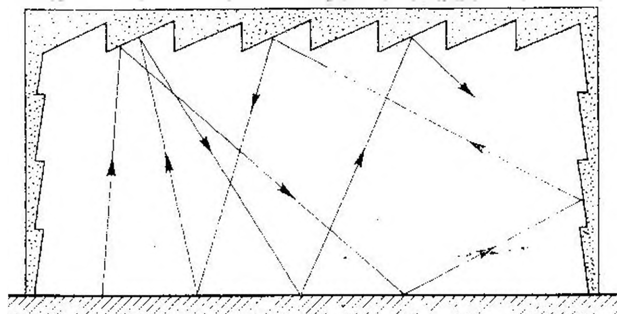
Sl. 4.41. Lijevo: nastanak lepršave jeke. Desno: vremenski slijed zvučnih impulsa



Sl. 4.42. Nastanak lepršave jeke utjecajem ploha koje nisu paralelne



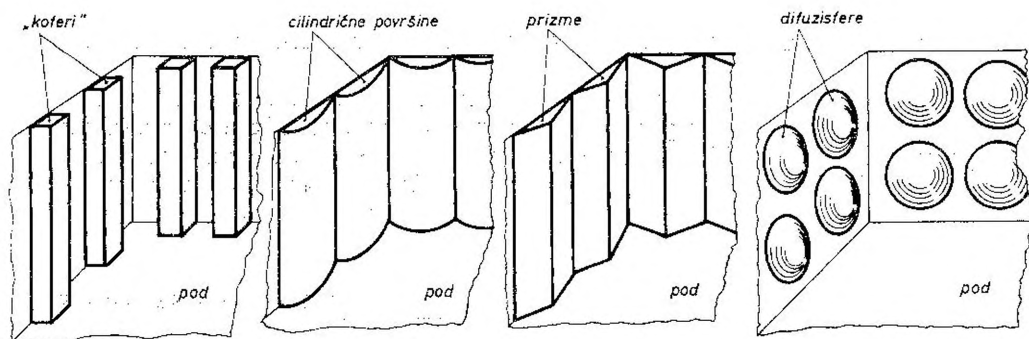
Sl. 4.43. I uz prizmatične difuzore na stropu može nastati flater-jeka.



Sl. 4.44. Zupčasti strop onemogućuje nastanak lepršave jeke.

4.3.7. Difuzori

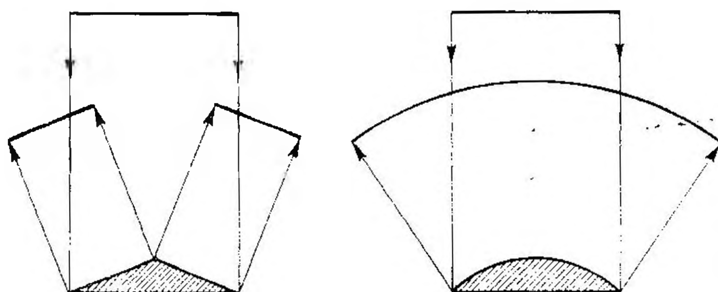
Kad se projektiraju koncertne dvorane i glazbeni studiji, nastoji se postići raspršenje, dakle difuzija zvuka. Veća difuzija omogućuje bolju jednolikost raspodjele zvuka u prostoriji.



Sl. 4.45. Različite vrste raspršivača zvučnih valova ili difuzora

Dva su načina kojima se povećava difuzija zvuka u prostoriji kojoj je već dan temeljni oblik. Prvi je postavljanje apsorpcijskih materijala, uglavnom na bočne zidove, jer strop mora ostati reflektor. Veličina je dopustive apsorpcijske površine ograničena jer prostorija mora imati određen odjek. Stoga se češće primjenjuje drugi način prema kojemu se površinama zidova dade nepravilan oblik ili se one učine *konveksnima*. Danas se za te svrhe najviše upotrebljavaju prizmatične ili polucilindrične površine, a katkada i sferne (sl. 4.45). Cilindrična je površina u prednosti pred prizmatičnom jer daje difuzniju refleksiju (sl. 4.46). To pogotovu vrijedi za sfernu površinu koja raspršuje zvuk u svim smjerovima. Efikasnost takvih površina ovisi o odnosu njihovih dimenzija prema valnoj duljini zvuka. Da bi djelovanje bilo više-manje jednoliko u cijelome frekvencijskom području, treba da su prizme, policilindri, odnosno „koferi" i „difuzisfere" različitih dimenzija.

Pomoću opisanih izvedbi nije moguće postići potpunu difuznost zvučnog polja. To se i ne zahtijeva jer slušaocu godi kad može odrediti smjer zvučnog izvora. Zvučno polje treba da ima „živost" (engl. *liveness)* koja ne smije biti ni prevelika ni premalena.



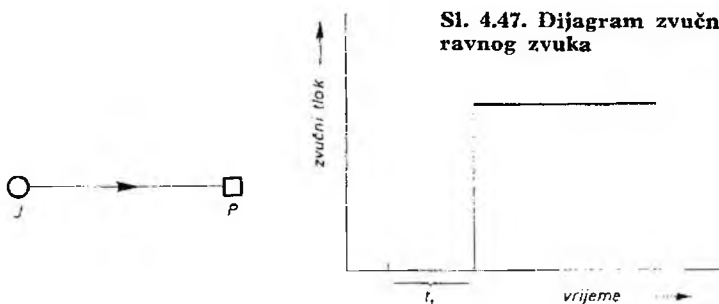
Sl. 4.46. Promjena oblika čela zvučnog vala nakon reflektiranja od prizmatičnog i cilindričnog difuzora

4.4. ODJEK

4.4.1. Dozvuk i odjek

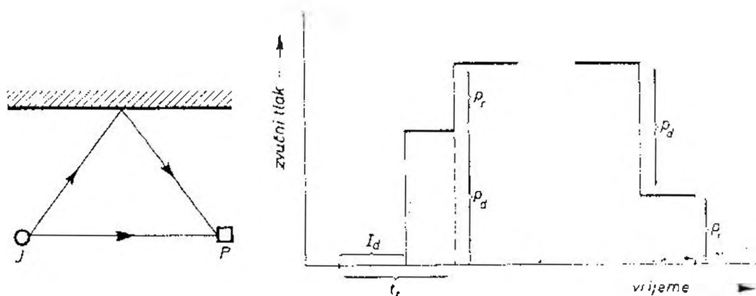
Razmotrit ćemo što se događa sa zvukom koji emitira neki izvor u zatvorenoj prostoriji.

Počet ćemo od širenja zvuka na otvorenom prostoru. Kad izvor zvuka *I* (sl. 4.47) počne emitirati, mora proći neko vrijeme t_1 dok zvuk stigne do prijemnika *P* (mikrofon ili uho). Nakon tog trenutka vlada na mjestu prijemnika konstantan zvučni tlak. Poslije prekida emisije ostaje zvučni tlak konstantan cijelo vrijeme za koje zvuk putuje od izvora do prijemnika, a nakon toga padne na vrijednost nula.



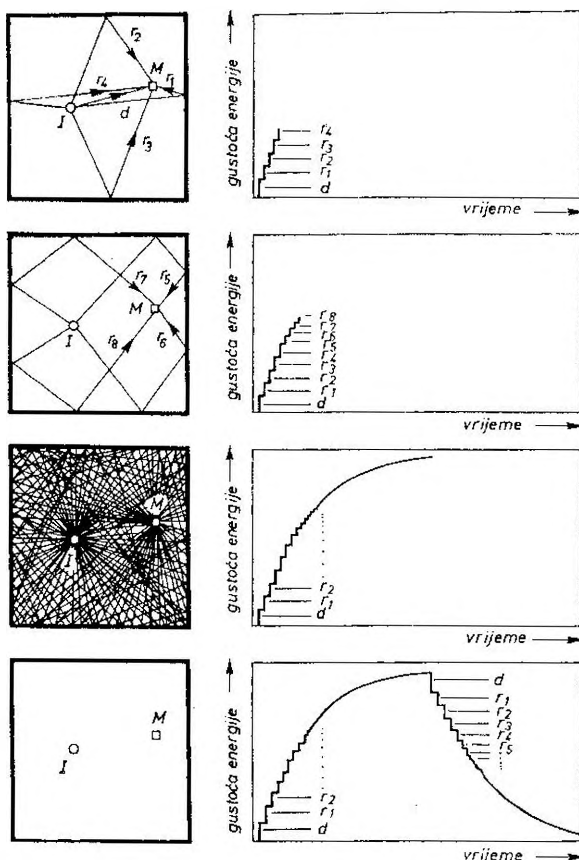
Sl. 4.47. Dijagram zvučnog tlaka izravnog zvuka

Pretpostavit ćemo da je bočno od izvora i prijemnika stijena (sl. 4.48). Uz isti način emitiranja kao prije dolazit će zvuk do prijemnika dvama putovima, direktno i reflektiranjem od stijene. Budući da odbijeni zvuk treba da prevali dulji put, stiže kasnije, nakon direktnog zvuka. Oba zvuka zajedno daju povećani tlak, što je u dijagramu izraženo stepenicom. Kad prestane djelovati izvor, najprije će prestati stizati direktni, a nakon toga reflektirani zvuk. Tlak će, dakle, također stepeničasto opasti.



Sl. 4.48. Dijagram zvučnog tlaka izravnog i odbijenog zvuka nakon početka emitiranja i po njegovu prestanku

U zatvorenoj prostoriji nastaje mnogostruka refleksija od svih stijena. Stoga će se zvučni tlak povisivati u dijagramu skokovito, s mnogo stepenica (sl. 4.49). Budući da se prilikom svake refleksije jedan dio zvučne energije apsorbira, visina kasnijih stepenica bit će u dijagramu sve manja jer one pripadaju zvučnim zrakama

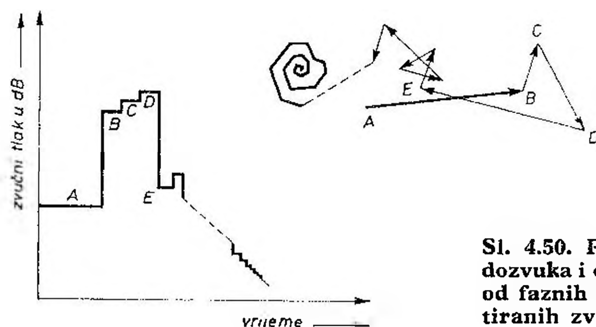


Sl. 4.49. Konstrukcija krivulje dozvuka i odjeka na principu reflektiranja zvučnih zraka (prema Olsonu)

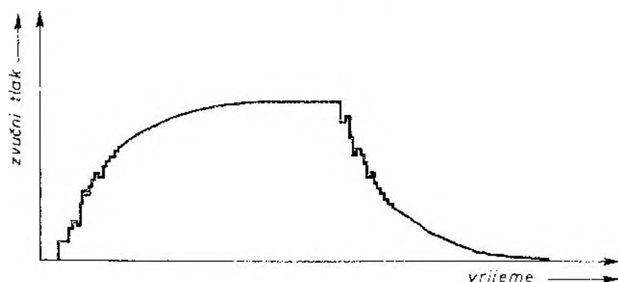
koje nakon višestruke refleksije postepeno sve više gube jakost. Zvučni se tlak, dakle, povisuje *eksponencijalno. Stacionarno se stanje uspostavlja onda kad nastane ravnoteža između emitirane i apsorbirane energije.*

Proces utišavanja zvuka po prestanku djelovanja zvučnog izvora također se odvija stepeničasto. Budući da niže stepenice pripadaju zvučnim zrakama koje su se mnogostruko reflektirale i time postupno gubile intenzitet, svaka će niža stepenica imati manju visinu od prethodne. I taj se proces odvija, dakle, po *eksponencijalnom zakonu.*

U promatranju procesa porasta i opadanja zvučnog tlaka pretpostavili smo da na mjesto prijemnika svi zvučni valovi stižu u fazi. Dakako, to u stvarnosti neće biti tako. Pojedini valovi dolazit će do prijemnika u svim mogućim faznim odnosima, tako da se stepenice neće samo dodavati, nego i odbijati, otprilike onako kao na sl. 4.50. Osnovna krivulja po kojoj zvučni tlak raste ili opada, ipak će biti eksponencijalna, onakva kakvu predočuje sl. 4.51. Proces eksponencijalnog rasta zvučnog tlaka (ili intenziteta zvuka, ili gustoće zvučne energije) do stacionarnog stanja naziva se *dozvukom.* Suprotan proces, koji se odvija nakon prestanka djelovanja zvučnog izvora, proces eksponencijalnog opadanja zvučnog tlaka (ili intenziteta zvuka, ili gustoće zvučne energije) jest *odjek* ili *reverberacija.*



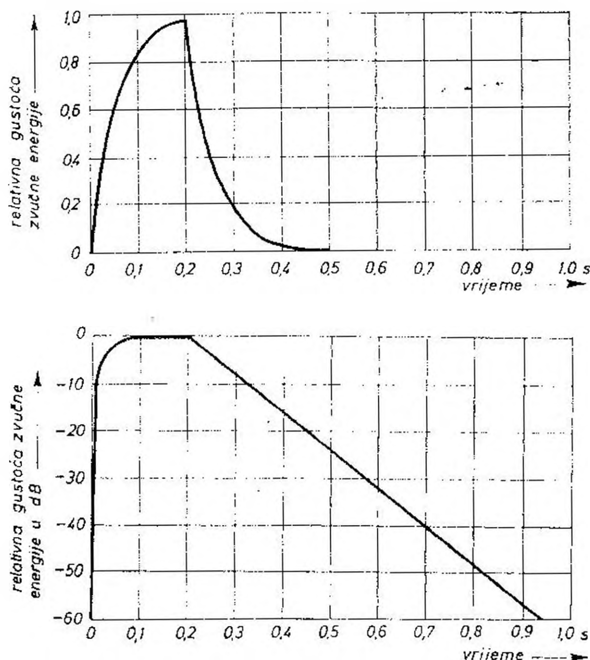
Sl. 4.50. Pri crtanju stepeničaste krivulje dozvuka i odjeka trebalo bi zapravo polaziti od faznih odnosa između pojedinih reflektiranih zvučnih valova.



Sl. 4.51. Iako zvučni valovi stižu na pojedino mjesto prostorije s različitim fazama, proces dozvuka i odjeka u biti je ipak eksponencijalan.

Na sl. 4.52. gore vidimo ponovno krivulju dozvuka i odjeka crtanu na prijašnji način, dok su dolje ovi akustički procesi predočeni uz logaritamsku skalu na ordinati. Drugi način prikazivanja za nas je posebno važan zbog toga što je bliži tome kako proces dozvuka i odjeka čuje uho. Zbog karakteristike koju ima uho proces dozvuka subjektivno traje znatno kraće nego proces odjeka. To je razlog zašto se dozvuk može sluhom osjetiti samo u vrlo velikim dvoranama. Odjek se, naprotiv, čuje u svim neprigušenim prostorijama, i to približno kao linearno opadanje glasnoće sve do praga čujnosti.

Iz iskustva znamo da je u velikim prostorijama odjek općenito dulji nego u malima. To se može rastumačiti time što u njima nastaje manje refleksija u jedinici vremena jer zvučna zraka mora između dva uzastopna odraza prevaliti dulji put. Uz manje refleksija apsorbira se u jedinici vremena manje zvučne energije, pa proces odjeka dulje traje.



Sl. 4.52. Krivulja dozvuka i odjeka crtana uz linearnu skalu gustoće zvučne energije (gore), i uz logaritamsku skalu, linearnu i u decibelima (dolje)

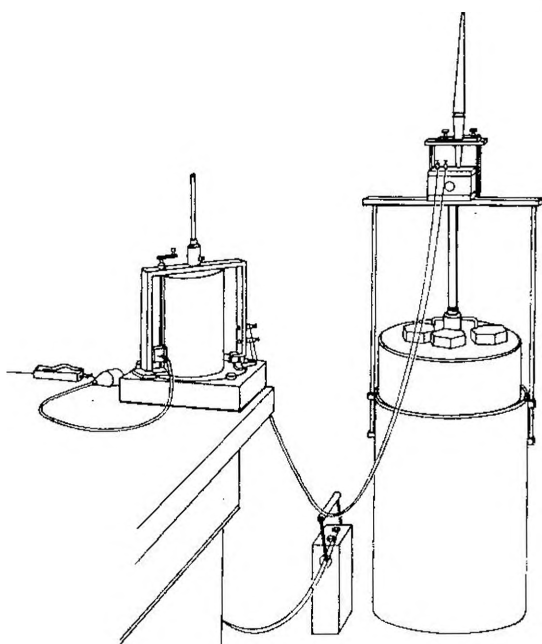
4.4.2. Izračunavanje vremena odjeka

Znanstvene temelje akustici prostorija postavio je, kao što smo već spomenuli, američki fizičar *W. C. Sabine.* Vrlo je poučno poći onim redoslijedom razmišljanja i istraživanja kojim je on išao, pa ćemo to ukratko i učiniti.

Sabineova istraživanja počinju 1895. godine. Već prije je rečeno da je uprava Harvardskog sveučilišta u Cambridgeu, kraj Bostona, zatražila od Sabinea da ispita kako bi se mogla popraviti vrlo loša akustika u velikoj sveučilišnoj predavaonici. Prišavši zadatku Sabine je najprije utvrdio da o tom problemu nije napisano ništa što bi se moglo koristiti. Nije mu preostalo drugo nego da sam istraži kojim zahtjevima treba udovoljiti da se postigne dobro slušanje. O tome je napisao: „*Da bi slušanje u nekoj dvorani bilo dobro, potrebno je da zvuk bude dovoljno glasan, da istodobne komponente kompleksnog zvuka zadrže svoje relativne intenzitete, i da zvukovi koji brzo slijede jedan za drugim, bilo u govoru ili u muzici, budu jasni i razgovijetni, nepomiješani ni međusobno ni s vanjskom bukom. Ta su tri uvjeta potrebna i posve dovoljna za dobro slušanje.*"

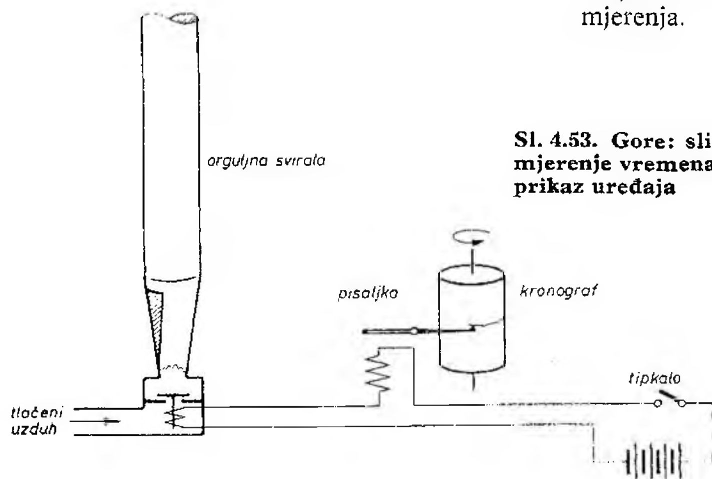
Sabine je svu svoju pažnju obratio posljednjemu od tih uvjeta, smatrajući ga najvažnijim u vezi s akustičkom kvalitetom prostorije. Uzrok nerazumljivosti govora u velikoj prostoriji, odnosno miješanju susjednih slogova, svakako je u suviše polaganom prigušivanju zvučne energije, što se događa tek nakon mnogih refleksija od stijena prostorija. Drugim riječima, nerazumljivost govora posljedica je predugog odjeka.

Nakon te konstatacije postavilo se pitanje kako mjeriti odjek. Služeći se sredstvima koja su mu u ono vrijeme bila dostupna, pokušao je tok opadanja intenziteta zvuka mjeriti objektivnim metodama. Rezultati ga nisu zadovoljili jer ih nije mogao precizno interpretirati. Opazio je da će pomoću kronografa i uha moći mnogo točnije odrediti trajanje odjeka. U Sabineovo vrijeme nije, naime, bilo logaritamskih mjerača, a karakteristika je uha približno logaritamska.



Sabineov mjerni uređaj bio je sastavljen od više elemenata (sl. 4.53). Za izvor zvuka služila mu je orguljna svirala koja je proizvodila ton frekvencije 512 Hz. Iz posebnog spremnika konstantnog tlaka zrak je u sviralu dolazio preko ventila koji se električki zatvarao. Kronograf je bio građen u obliku valjka što se okreće konstantnom brzinom, i na kojemu je pisaljka, aktivirana elektromagnetom, upisivala znak. Oba elektromagneta, onaj u svirali i ovaj uz pisaljku, bili su u istome strujnom krugu u kojem je bilo (osim baterije) još i tipkalo.

Da bi se izbjegao utjecaj vanjske buke, eksperimentiralo se noću. Osoba koja je izvodila mjerenje bila je, držeći tipkalo, zatvorena u jednom ormaru, samo glavom izvan njega. Time se htio ukloniti utjecaj odijela i vlastitog gibanja na rezultat mjerenja.



Sl. 4.53. Gore: slika Sabineova uređaja za mjerenje vremena odjeka. Dolje: shematski prikaz uređaja

Opisat ćemo proces mjerenja. Otpuštanjem tipkala aktivirala se svirala. Nakon nekoliko sekunda, kad je postignuto stacionarno stanje zvučnog polja, ispitanik je pritisnuo tipkalo. U tom trenutku svirala je prestala emitirati zvuk, a pisaljka je upisala znak na kronografu. Ispitanik je slušao zvuk odjeka koji je postajao sve tiši, i u momentu kad ga više nije čuo, ponovno je otpustio tipkalo. Pisaljka je opet upisala znak i svirala je iznova zasvirala. To se ponavljalo oko dvadeset puta.

Rezultati prvih mjerenja vremena utišavanja zvuka u spomenutoj sveučilišnoj predavaonici dobiveni na opisani način nisu bili posve jednaki, ali razlika nije bila znatna; zapravo je bila tolika koliku nužno uvjetuju subjektivni činioci pri mjerenju. I rezultati slijedećih noći bili su približno jednaki, a i oni ponovljeni poslije nekoliko mjeseci, pa čak i nakon više godina. Konstantnost rezultata postignuta je i prilikom mjerenja u drugim dvoranama. I druge osobe dobile su iste takve rezultate. Time je valjanost ove eksperimentalne metode bila dokazana.

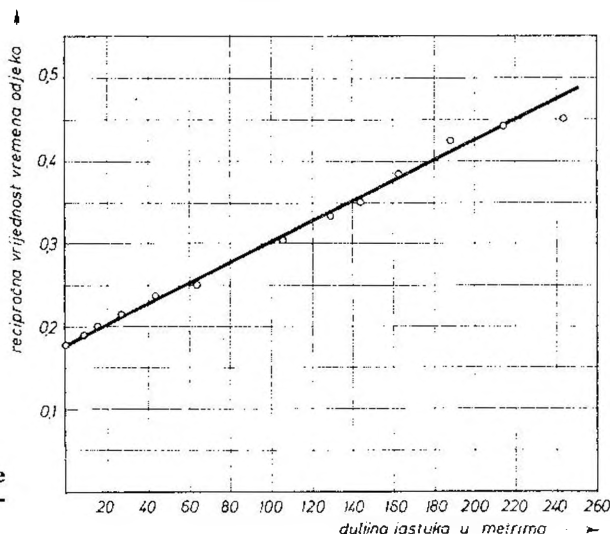
Na temelju mnogobrojnih mjerenja Sabine je došao do ovih zaključaka:

1. vrijeme utišavanja zvuka praktički je jednako na svim mjestima u dvorani;
2. vrijeme utišavanja zvuka praktički ne ovisi o položaju izvora zvuka;
3. djelovanje apsorpcijskih materijala postavljenih da bi se smanjilo vrijeme utišavanja, uzevši općenito, ne ovisi o njihovu položaju (da smanji vrijeme utišavanja zvuka, Sabine je postavio u sveučilišnoj predavaonici 50 m naboranog kretona smanjivši time vrijeme utišavanja sa 5,57 s na 4,87 s).

Tražeći način kako da smanji vrijeme utišavanja Sabine je u dvorani rasprostro na stanovitoj duljini posebne jastuke. Mjereći vrijeme utišavanja našao je da su duljina jastuka x i vrijeme utišavanja T međusobno vezani ovim hiperboličkim zakonom* (sl. 4.54):

$$(a + x)\,T = K \qquad (4.5)$$

Tu su a i T konstante koje se odnose na određenu dvoranu i na tip jastuka.



Sl. 4.54. Dijagram koji je Sabine dobio na temelju svojih mjerenja

* Zaključivši da je umnožak ukupne apsorpcije i vremena trajanja preostalog zvuka konstantan, Sabine je trijumfalno uzviknuo svojoj majci: „Majko, pa to je hiperbola!"

Ovaj na temelju pokusa dobiveni zakon dao je Sabineu ideju da a predstavlja apsorpciju onih površina u dvorani koje nisu pokrivene jastucima, ali apsorpciju izraženu u jedinicama duljine jastuka. Tako je spoznao da vrijeme utišavanja ovisi o totalnoj apsorpciji dvorane A, pa jednadžba dobiva oblik:

$$A \cdot T = K \tag{4.6}$$

Sabine se nije zadovoljavao jedinicom apsorpcije koju bi predstavljala duljinska jedinica određenih jastuka. Opazio je da se u načelu ništa ne mijenja pretvara li se zvučna energija u nekom apsorberu u toplinu ili izlazi kroz neki otvor. Stoga je poduzeo eksperimentiranje povezano s apsorpcijom otvorenih prozora. Pri tome je naišao na velike teškoće. Zimi mu je smetala buka vjetra, a ljeti cvrčanje cvrčaka. Ta je buka, naime, maskirala završetak utišavanja tona i kvarila rezultate mjerenja. Izgleda da zbog toga Sabine nije mogao izmjeriti apsorpciju otvorenih prozora. Ustanovio je, međutim, da je otvoren prozor najbolji apsorber i da je apsorpcija razmjerna površini prozora. Eksperimenti su mu također pokazali da 1 m^2 upotrijebljenih jastuka apsorbira koliko i 0,8 m^2 otvorenog prozora. Iz toga je mogao zaključiti kolika je totalna apsorpcija mjerene predavaonice, izražena također površinom otvorenih prozora.

U formuli $AT = K$ trebalo je odrediti konstantu K. Sabine je mjerio u dvanaest dvorana različita oblika i raznih volumena, te našao da između konstante K i volumena V vlada linearan odnos:

$$K = 0{,}171\ V \tag{4.7}$$

To je Sabineova formula u svome originalnom obliku.

Protumačit ćemo linearan odnos između K i V. Totalna apsorpcija A razmjerna je površini, dakle kvadratu linearne dimenzije l. Zvuk se pri utišavanju priguši pri svakoj refleksiji za jednak iznos. Prema tome je vrijeme utišavanja obrnuto razmjerno broju refleksija. Isto je tako broj odraza obrnuto razmjeran linearnoj dimenziji prostorije. Dakle, vrijeme utišavanja T razmjerno je dimenziji l. Iz svega izlazi konačan zaključak da je K razmjerno l^3, dakle volumenu. Tome treba dodati da iako se s oblikom prostorije broj refleksija mijenja, ipak, kao što pokusi pokazuju K samo neznatno ovisi o obliku prostorije.

Sabine je zapazio da vrijeme utišavanja koje se dobiva upotrebom jednoga određenog izvora zvuka, u njegovu primjeru orguljne svirale, ne može poslužiti kao osnovica da se dobije apsolutna jedinica za apsorpciju zvuka. Stoga je eksperimentirao četirima sviralama i to tako da je redom mjerio vrijeme utišavanja najprije poslije sviranja jedne svirale, pa nakon dvije, zatim poslije tri i, napokon sviranja četiri svirale zajedno. Uspoređujući tako dobivena četiri vremena utišavanja uočio je da postoji isti omjer između vremena utišavanja što se dobiva s jednom i dvije svirale, kao i uz dvije i četiri svirale. Time je ustanovio da se udvostručujući snagu zvučnog izvora vrijeme utišavanja povećava za isti iznos. Na taj je način došao do vrlo važne spoznaje da intenzitet zvuka prilikom utišavanja opada po eksponencijalnom zakonu:

$$I = I_0 \cdot e^{-kt} \tag{4.8}$$

Pri tome je I_0 početni intenzitet. Izračunavši iz rezultata svojih pokusa konstantu k i uvrstivši vrijeme utišavanja T, našao je da se početni i konačni intenzitet odnose približno kao $10^6 : 1$ (danas znamo da je početna razina glasnoće bila oko 60—70

fona). Iz toga izlazi Sabineova definicija trajanja odjeka: *to je vrijeme utišavanja uz takav zvučni izvor koji emitira zvuk intenziteta milijun puta većega od intenziteta na pragu čujnosti.*

Uvrstimo li taj broj u jednadžbu (4.8), dobiva se:

$$kT = \ln 10^6 = 13{,}8 \tag{4.9}$$

Nakon mnogobrojnih pokusa Sabine je našao da je ona konstanta u jednadžbi (4.7) stvarno nešto manja, tj.:

$$K = 0{,}161\ V \tag{4.10}$$

Kako iz jednadžbe (4.6) izlazi da je $T = K/A$, definitivna Sabineova formula za vrijeme odjeka* bit će:

$$T = \frac{0{,}161\ V}{A} \tag{4.11}$$

Naglašavamo da je tu T vrijeme u sekundama dobiveno na osnovi odnosa početnog i konačnog intenziteta $10^6 : 1$ ili 60 dB, a apsorpcija A izražena je u kvadratnim metrima otvorenog prozora ili sabinima**. Volumen treba uvrstiti u kubičnim metrima. Sabine je, dalje, stavio da je $A = aS$. Tu je a koeficijent apsorpcije, koji je najveći za otvoren prozor, i ima vrijednost jedan. Koeficijent a zidova, drvenih ploha, stakla, apsorpcijskog materijala manji je od jedan. S je površina svih ploha u prostoriji. Ako neka prostorija ima i površina veličine S_1, S_2, $S_3 \ldots S_i$, od kojih svaku sa svojim koeficijentom apsorpcije a_1, a_2, a_3, . . ., a_i, prema Sabineu vrijedi:

$$aS = a_1S_1 + a_2S_2 + a_3S_3 + \ldots + a_iS_i \tag{4.12}$$

Odatle je srednji koeficijent apsorpcije:

$$a = \frac{a_1S_1 + a_2S_2 + a_3S_3 + \ldots + a_iS_i}{S} \tag{4.13}$$

4.4.3. Eyringova i Millingtonova formula

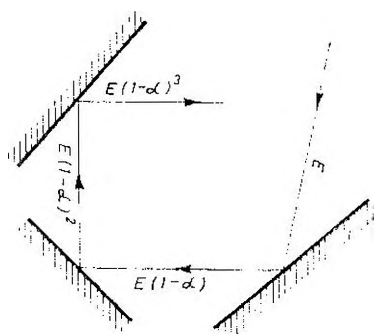
Iako je proces odjeka relativno složen, Sabineova je formula jednostavna i zbog toga vrlo prikladna za upotrebu. No treba odmah reći da ona vrijedi samo za „ječne" prostorije, dakle samo onda kad se zvuk za vrijeme odjeka reflektira mnogo puta, tako da se može smatrati da je zvučna energija jednoliko raspodijeljena po cijeloj prostoriji. Ako je riječ o „prigušenoj" prostoriji, dakle o malobrojnim refleksijama zvuka za vrijeme odjeka, Sabineova formula ne daje realne rezultate. To se najlakše može vidjeti iz ekstremnog slučaja kad je prostorija tako prigušena da je koeficijent apsorpcije približno jednak jedan. Tad odjeka praktički nema. Naprotiv, Sabineova formula daje vrijeme odjeka $T = 0{,}161\ V/S$.

---

* U angloameričkoj literaturi Sabineova formula ima oblik: $T = 0{,}049\ V/A$. Razlog drukčijem faktoru je u tome što se volumen V uvrštava u kubičnim stopama i apsorpcija A u kvadratnim stopama.

** Naziv je jedinica dobila poslije, u čast W. C. Sabinea, utemeljitelja nauke o akustici prostorija.

Formula kojom se isključuje ta pogreška dobiva se posebnim razmatranjem. Između svake dvije uzastopne refleksije zvuk prijeđe različite putove l_1, l_2, l_3, . . ., l_n. Radi jednostavnosti računat ćemo samo s jednim l koji ćemo nazvati *srednjim slobodnim putem zvuka.* Kao primjer uzmimo dvoranu kojoj je srednji slobodni put dug 20 m, a koeficijent apsorpcije za sve zidove neka je 0,6. Budući da zvuk u svakoj sekundi prijeđe 340 m, u dvorani nastaje 340/20 = 17 refleksija u sekundi. Prilikom svake refleksije ostane (1 — 0,6) od prijašnjega zvučnog intenziteta, dakle nakon N odraza bit će $(1 - 0{,}6)^N$ (sl. 4.55). Za vrijeme odjeka prema definiciji zvučni intenzitet padne na 10^6 puta manju vrijednost. Za naš primjer izlazi: $(1 - 0{,}6)^N = 10^{-6}$. Iz toga dobivamo da je broj refleksija za vrijeme odjeka $N = 15$. Budući da u sekundi nastaje 17 odraza, vrijeme je odjeka $T = 15/17 = 0{,}88$ s.



Sl. 4.55. Nakon svake refleksije gustoća je zvučne energije manja.

Vratit ćemo se načas opet na srednji slobodni put l. Na kraju ove knjige dodan je dokaz *(Prilog 2)* iz kojega izlazi da je uz dovoljan broj refleksija srednji slobodni put:

$$l = \frac{4V}{S} \tag{4.14}$$

Knudsen je mjerenjem u jedanaest prostorija posve različita oblika dobio rezultat da je srednji slobodni put praktički neovisan o obliku prostorije.

U našem je primjeru $l = 20$ m. Tad možemo naći vrijeme odjeka pomoću Sabineove formule (faktor 0,161 zaokružit ćemo na 0,16):

$$T = 0{,}16 \frac{V}{0{,}6S} = 1{,}33 \text{ s}$$

Kao što se vidi, vrijeme odjeka po Sabineu znatno je dulje od prije izračunanoga.

Prijeđimo zatim na općenit slučaj. Broj refleksija u sekundi dobiva se podijelimo li brzinu zvuka sa srednjim slobodnim putom:

$$n = \frac{c}{4\,V/S} = \frac{cS}{4\,V} \tag{4.15}$$

Ukupan broj refleksija za vrijeme odjeka dobiva se iz $(1 - \alpha)^N = 10^{-6}$, pa izlazi:

$$N = \frac{-6}{\log(1 - \alpha)} = \frac{-6 \cdot \ln 10}{\ln(1 - \alpha)} \tag{4.16}$$

Budući da je:

$$T = \frac{N}{n} = \frac{4NV}{cS} = \frac{24 \ln 10}{c} \cdot \frac{V}{-S \ln (1-\alpha)} \tag{4.17}$$

bit će:

$$T = 0{,}16 \frac{V}{-S \ln (1-\alpha)} \tag{4.18}$$

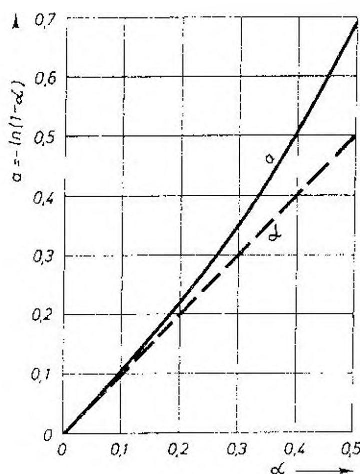
Tu je α srednji koeficijent apsorpcije definiran na jednak način kao i kod Sabinea. Ovu je formulu *C. F. Eyring* iznio i protumačio na svom predavanju u Društvu akustičara Amerike 1929. godine*.

Sabineova je formula poseban slučaj Eyringove formule. Faktor u nazivniku Eyringove formule možemo, naime, i ovako pisati:

$$-\ln (1-\alpha) = \frac{\alpha}{1} + \frac{\alpha^2}{2} + \frac{\alpha^3}{3} + \ldots \tag{4.19}$$

Za male vrijednosti α članovi s potencijama postaju zanemarivo maleni, pa je $-\ln (1-\alpha) = \alpha$.

Kao što izlazi iz dijagrama na sl. 4.56, Sabineova formula daje točne rezultate do vrijednosti srednjeg koeficijenta apsorpcije od oko 0,2.



Sl. 4.56. Dijagram koji pokazuje kolika je razlika između α i a = ln (1 − α)

G. Millington je također uzeo da se površina dvorane S sastoji od površina S_1, S_2, S_3, ..., S_i, gdje je svaka sa svojim koeficijentom apsorpcije α_1, α_2, α_3, ..., α_i. Ako za vrijeme odjeka nastaje N refleksija na površini S, onda će N_1 refleksija biti na površini S_1, N_2 na površini S_2 itd. Uz pretpostavku da je broj refleksija razmjeran površini, vrijedi odnos:

$$N_1 = N\frac{S_1}{S}, \quad N_2 = N\frac{S_2}{S}, \quad \ldots, \quad N_i = N\frac{S_i}{S} \tag{4.20}$$

* Međusobno neovisno ovu su formulu osim Eyringa izveli također Norris, Schuster i Waetzmann.

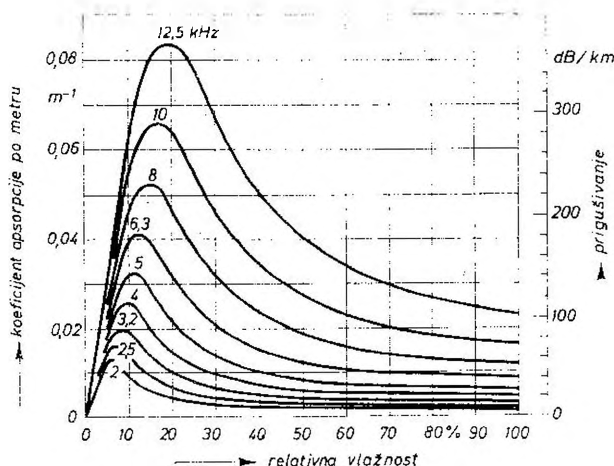
Uz postupak kojim se služio Eyring dobiva se rezultat:

$$T = \frac{0,16\ V}{-S_1 \ln(1-a_1) - S_2 \ln(1-a_2) - \ldots - S_i \ln(1-a_i)} \tag{4.21}$$

$$T = \frac{0,16\ V}{-\Sigma S_i \cdot \ln(1-a_i)}$$

4.4.4. Apsorpcija zvuka u atmosferi

Na višim se frekvencijama zvučna energija osim na graničnim plohama prostorije apsorbira još i u zraku (molekularna apsorpcija). Apsorpcija u zraku ovisi o njegovoj relativnoj vlažnosti*. Tu ovisnost na nekoliko frekvencija, i to za temperaturu od 20 °C, prikazuje dijagram na sl. 4.57. U formulama u kojima je uračunata i apsorpcija zraka ekvivalentna apsorpcijska površina izražena je članom $4mV$, tako da formule glase (vidi *Prilog* 3):



Sl. 4.57. Ovisnost koeficijenta apsorpcije zraka o relativnoj vlažnosti, s frekvencijom kao parametrom i pri temperaturi od 20°C

* Zrak ima sposobnost da prima vodu u obliku pare. Količina vode koju on može primiti povećava se s porastom temperature. Kilogram potpuno suhog zraka može uz barometarski tlak od 1 bar primiti ove količine vode:

pri 20 °C	15 g
pri 30 °C	27 g
pri 40 °C	49 g

Uz tu količinu vode zrak je potpuno zasićen i njegova je vlažnost stopostotna.

Ako se suhi zrak koji je pri temperaturi od 30 °C primio 27 g vodene pare zagrije do 40 °C, zrak neće biti zasićen jer sadrži (27/49) × 100 = 55% one količine vode koja je potrebna da ga zasiti. Relativna vlažnost iznosi, dakle, 55%. Naprotiv, ako se kilogram zraka zasićen pri temperaturi od 30 °C ohladi do 20 °C, u njemu se ne može zadržati svih 27 g vlage, već samo 15 g. Ostatak se izluči u obliku magle ili rose.

Pod relativnom vlažnošću zraka razumijeva se odnos apsolutnog sadržaja vode u nekoj količini zraka prema sadržaju vode koju ta količina zraka može uz istu temperaturu i isti barometarski tlak primiti da se potpuno zasiti.

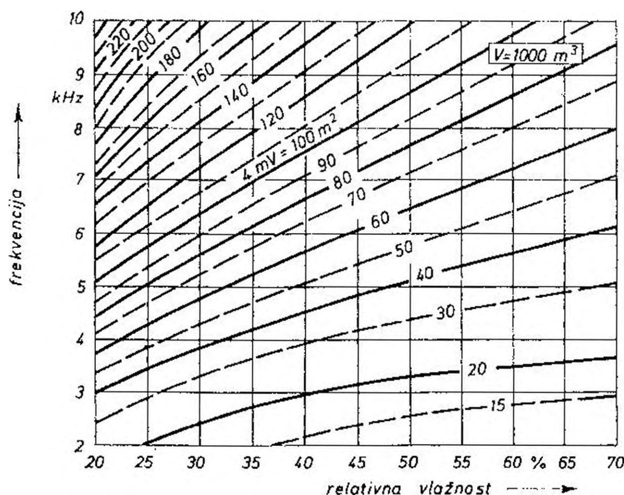
Čovjek se ugodno osjeća uz relativnu vlažnost od 40% do 70%.

$$T = \frac{0{,}16\,V}{4\,mV + A} \qquad (4.23)$$

$$T = \frac{0{,}16\,V}{4\,mV - S \ln (1 - \alpha)} \qquad (4.24)$$

$$T = \frac{0{,}16\,V}{4\,mV - \Sigma S_i \cdot \ln (1 - \alpha)} \qquad (4.25)$$

m je keoeficijent apsorpcije zraka, a V je volumen. U sve ove formule volumen V valja uvrstiti u m^3, apsorpciju A u m^2 Sabineovim, a površinu S u m^2 da bi se vrijeme odjeka T dobilo u sekundama. U dijagramu na sl. 4.58. prikazana je ovisnost ekvivalentne apsorpcije $4\,mV$ o relativnoj vlažnosti i frekvenciji za volumen od 1 000 m^3.



Sl. 4.58. Ekvivalentna apsorpcijska ploha zraka 4 mV ovisno o relativnoj vlažnosti zraka i frekvenciji, za volumen prostorije od 1000 m^3

Koeficijent m je za frekvencije niže od 1 000 Hz zanemarivo malen. Budući da iznad te frekvencije m brzo raste, apsorpcija na visokim frekvencijama ima velik utjecaj. Tako u velikim dvoranama može apsorpcija zraka na frekvenciji od 4000 Hz biti jednaka apsorpciji graničnih ploha dvorane ili čak i veća od nje.

4.4.5. Odjek je zvučno istitravanje na prirodnim frekvencijama prostorije

Naša dosadašnja izlaganja o procesu dozvuka i odjeka temeljili smo na pretpostavci da se zvuk širi „zrakasto", kao npr. zrake svjetlosti. Prema ovoj akustici, *geometrijskoj akustici*, zvuk nakon stanovitog broja uzastopnih refleksija postaje difuzan, tj. širi se u svim mogućim smjerovima, tako da je zvučna energija jednoliko raspoređena po prostoriji. Tim načinom shvaćanja zvučnih procesa u prostoriji

sasvim se zanemaruju rezonantne frekvencije, interferencija i difrakcija. Iako suviše pojednostavnjena, ova akustika dovodi do mnogih principa i formula pomoću kojih akustičar i arhitekt mogu projektirati prostorije sa zadovoljavajućom akustikom.

Dublji prodor u zvučni proces koji se u prostoriji odvija u toku odjeka omogućuje *valna akustika.* Prije smo izložili kako nastaje titranje na vlastitim frekvencijama u prostoriji paralelepipedna oblika. Te frekvencije mogu se izračunati po formuli (4.1). Razlikujemo tri načina titranja.

Titranje prvog reda nastaje onda kad od faktora *p, q* i *r* dva bivaju jednaka nuli. Pri tome su sve komponente u harmoničkom odnosu, a energija struji između dva suprotna zida uzduž glavne osi prostorije.

Titranjem drugog reda nazivamo ono koje nastaje kad se jedan od faktora *p*, *q* i *r* izjednači s nulom. Tad energija struji između dva para zidova.

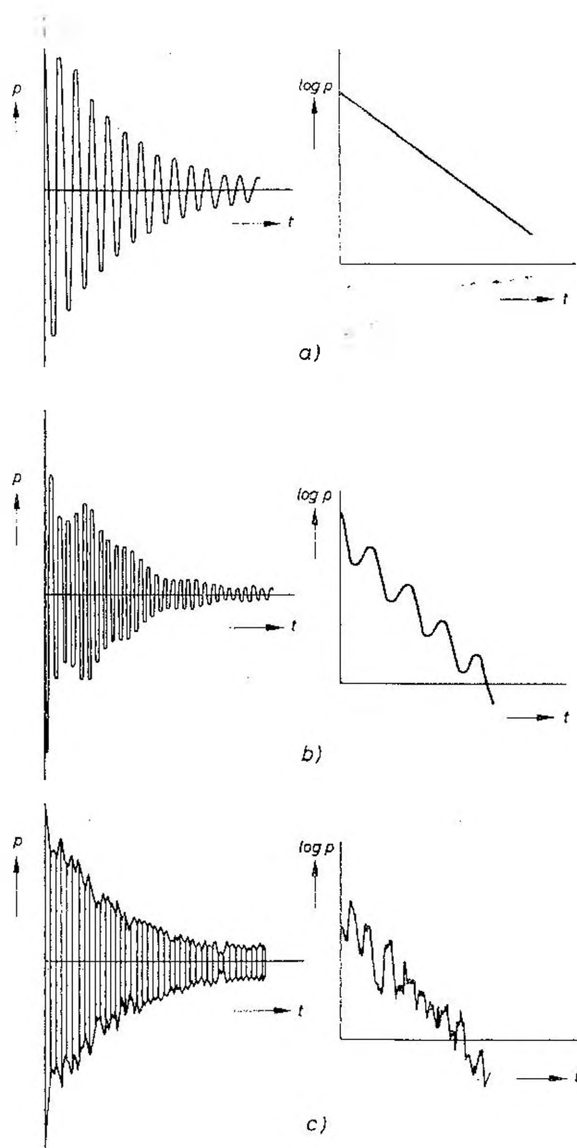
Titranje trećeg reda jest ono kad nijedan od faktora nije jednak nuli. Energija struji između sva tri para zidova.

Za sve ove valove neće apsorpcija zidova biti jednaka. Najveća će biti za valove koji udaraju okomito na zidove, manje za one što padaju na zid pod nekim kosim kutom, a najmanja za valove koji putuju paralelno sa zidovima. Prema tome, ako neki zvuk pobudi valove u sva tri smjera, neki će od njih za vrijeme odjeka trajati dulje pa će prevladavati.

Kao i svaki titrajni sistem — električki, mehanički — i prostorija kao akustički titrajni sistem (ili kombinacija titrajnih sistema) titra na onoj frekvenciji koju emitira izvor zvuka. Međutim, *čim se izvor isključi, titranje se naglo prebaci s nametnute frekvencije na najbližu, odnosno na najbliže prirodne frekvencije prostorije.* Ako je nametnuta frekvencija jednaka prirodnoj, onda dakako i istitravanje ima tu istu frekvenciju. Zvučni se proces, dakle, za vrijeme odjeka općenito sastoji od *istitravanja na prirodnim frekvencijama prostorije,* i to na onima koje su blize frekvenciji stacionarnog stanja. Broj potaknutih frekvencija ovisi o tome u kojem je frekvencijskom području nametnuta frekvencija, a amplituda im ovisi o blizini nametnute frekvencije (veća udaljenost, manja amplituda). Ako je nametnuta frekvencija niska, bit će i broj potaknutih malen jer u području niskih frekvencija malo je prirodnih (vidi spektar na sl. 4.7). Naprotiv, visoka nametnuta frekvencija potaknut će u toku odjeka mnogo prirodnih frekvencija prostorije. Dalji zaključak koji se iz toga može izvesti jest taj da zvučno polje u području niskih frekvencija *nije difuzno,* a u području visokih frekvencija difuznost će biti praktički postignuta.

Dijagram na sl. 4.59.*a* prikazuje istitravanje kad je nametnuta frekvencija jednaka prirodnoj. Amplituda opada eksponencijalno, što uz logaritamsku podjelu na ordinati daje pravac. U dijagramu na sl. 4.59*b* nametnuta frekvencija potaknula je dvije prirodne frekvencije, od kojih je jedna viša, a druga niža od nametnute. Zbog interferencije nastaje treptajna pojava, što dijagramu odjeka daje valovit tok. Tu su obje potaknute frekvencije jednako prigušene, što općenito ne mora biti.

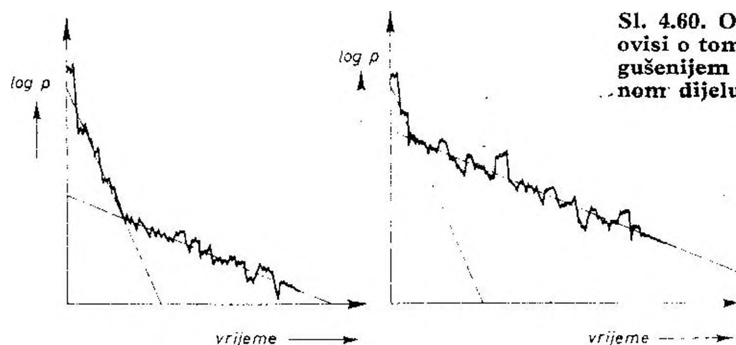
U trećem je dijagramu (sl. 4.59*c*) riječ o složenom zvuku koji je potaknuo cijeli niz frekvencija odjeka. Treptaji nastali interferencijom djelomično su se poništili, pa su kolebanja, iako brojnija, manje izražena. Konstante prigušenja za pojedine frekvencije mogu tu biti i sasvim različite, a da to na tok krivulje mnogo ne utječe. Jedino ako je u stacionarnom stanju djelovao širok spektar frekvencija, npr. nekoliko oktava, može zbog različitog prigušenja u pojedinim frekvencijskim područjima nastati bitna promjena karaktera zvuka. Ako se brzo priguše niske potaknute frekvencije, dobiva se kreštav zvuk. Prevladava ili apsorpcija na visokim frekvencijama, kaže se da prostorija zvuči „šuplje".



Sl. 4.59. Oscilogrami zvučnog tlaka za vrijeme procesa odjeka i njima pripadne logaritamske karakteristike odjeka

Dijagrami odjeka na sl. 4.59. u logaritamskom su sistemu u principu pravocrtna toka. Ako u prostoriji apsorpcijski materijali nisu jednoliko raspoređeni, krivulja odjeka poprima drukčiji oblik. Takva dva primjera su na sl. 4.60. U prvome je donja polovica prostorije jače prigušena, a u drugome gornja. Karakteristika odjeka ima dva dijela, od kojih je svaki drukčijeg nagiba. Slušajući odjek u donjem dijelu prostorije, u prvom primjeru najprije čujemo prirodne frekvencije koje se

brzo priguše u donjoj polovici, a tek onda ih čujemo iz gornje polovice, u kojoj je prigušenje manje. Slušamo li odjek u neprigušenoj polovici, kao u drugom primjeru, brzo će nestati utjecaj gornjega prigušenog dijela, pa ćemo čuti dugi odjek uzrokovan neprigušenom polovicom.



Sl. 4.60. Oblik krivulje odjeka ovisi o tome snima li se u prigušenijem ili manje prigušenom dijelu prostorije.

Valna akustika dala je odgovor na ona pitanja na koja nije mogla odgovoriti geometrijska akustika. Nastankom novih frekvencija u odjeku dobiva ton drugi karakter. Interferencijom dvaju tonova blizih po frekvenciji mijenja se zvučni tlak s frekvencijom od nekoliko herca; dolazi, dakle, do *vibrato-efekta*. Tome treba dodati da u svakoj prostoriji ima elemenata (strop, pod, zidovi) koji sami za sebe mehanički rezoniraju, ali, istitravajući, također emitiraju zvučnu energiju. Rezonantne frekvencije tih titrajnih sistema padaju u područje ispod 1000 Hz. Taj se efekt naročito zapaža u prostorijama s mnogo drvenih ploha. Osim prirodnih frekvencija prostorije sadržane su u odjeku i takve frekvencije, što dodatno mijenja tonsku boju.

Sada možemo dati odgovor na pitanje zašto je u dvjema prostorijama s istim vremenom odjeka i s praktički istom karakteristikom odjeka njegov efekt različit. Prema izloženome izlazi da je tome uzrok nastanak *novih frekvencija* u odjeku, koje u jednom slučaju nastupaju s drukčijim brojem, intenzitetom i međusobnim odnosom nego u drugom slučaju.

4.5. OPTIMALAN ODJEK

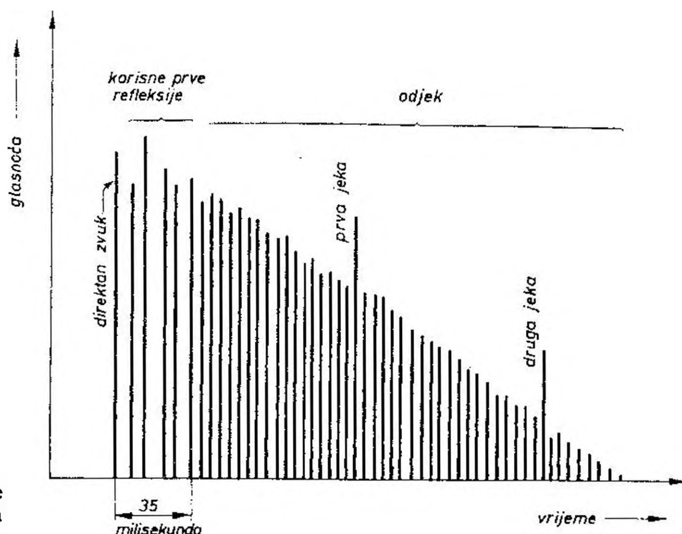
Kad se govori o optimalnom odjeku, ne misli se samo na *optimalno vrijeme odjeka* ili na *optimalnu frekvencijsku karakteristiku odjeka* već i na *optimalnu karakteristiku porasta i opadanja intenziteta zvuka u* prostoriji, te na *optimalan odnos reflektiranog zvuka prema direktnom zvuku* koji stiže do pojedinog slušatelja.

Refleksije koje do slušaoca dođu u vrlo kratkom vremenu nakon izravnog zvuka ne može uho razlikovati od direktnog zvuka. Svi se ti zvukovi stope u cjelinu, što rezultira porastom glasnoće. Nije moguće točno ustanoviti koje se refleksije stapaju u uhu s direktnim zvukom, ali se drži da su to one koje se nakon direktnog zvuka pojavljuju u vremenu od 35 ms. To je ono vrijeme za koje direktan zvuk prijeđe put od 10 m. Intenzitet zvuka u kasnijim je refleksijama zbog ap-

sorpcije sve slabiji. Refleksije koje „iskaču" iznad susjednih čuju se kao jeka. U procesu odjeka prikazanome na sl. 4.61. uočavamo da su nastale dvije jeke.

Za svaku prostoriju postoji neko određeno najpovoljnije vrijeme odjeka. Ono ne ovisi samo o volumenu prostorije nego i o svrsi kojoj je ona namijenjena. I difuznost prostorije utječe na optimalno vrijeme odjeka. Ako je ona loša, bolje je odabrati manje vrijeme odjeka.

S obzirom na upotrebu prostorije razlikujemo optimalno vrijeme odjeka u onima koje služe za govor i u glazbenim dvoranama. U vezi s akustičkim svojstvima prostorija možemo prema tome govoriti o *govornoj akustici* i *muzičkoj akustici*.



Sl. 4.61. Karakteristike zvuka u procesu odjeka

4.5.1. Govorna akustika prostorija

Dobre akustičke osobine ima ona prostorija koja omogućuje visoku razumljivost govora na svim mjestima, odnosno na svim sjedalima. Osnova po kojoj se ocjenjuju akustičke osobine prostorije namijenjene govornim svrhama je *slogovna razumljivost.* Mjerenje se izvodi na taj način da govornik izgovara slogove koji sami po sebi nemaju neko značenje u jeziku, a stanovit broj slušalaca upisuje ono što čuje. Postotni iznos ispravno uhvaćenih slogova daje slogovnu razumljivost.

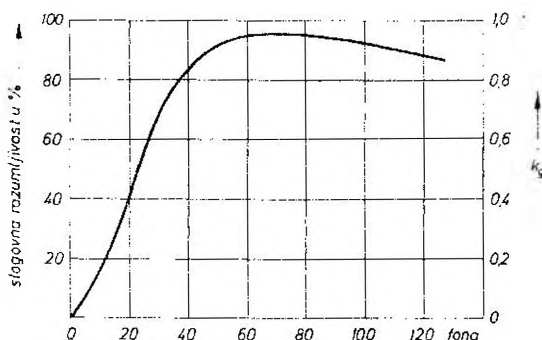
Slogovna razumljivost u nekoj dvorani ovisi o glasnoći koja se postiže na mjestu slušatelja, o vremenu odjeka i o razini buke. Za izračunavanje slogovne razumljivosti vrijedi formula:

$$S_r = 96 \cdot k_g \cdot k_o \cdot k_b \,(\%) \qquad (4{,}26)$$

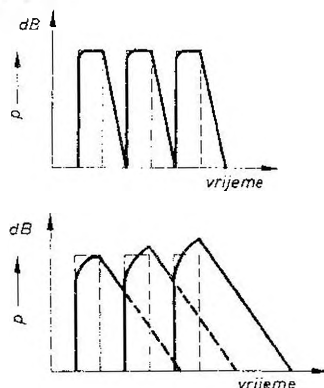
Faktorom 96 uzima se činjenica da ni u idealnim okolnostima slogovna razumljivost S_r nije stopostotna jer neizbježno nastaju pogreške u izgovoru govornika i povremena nepažnja slušalaca. Faktori k su faktori redukcije: faktor k_g ovisi o glasnoći, faktor k_o o vremenu odjeka, a faktor k_b o razini buke.

Ako su faktori k jednaki jedinici, dobiva se slogovna razumljivost od 96%. Tad se govor može savršeno pratiti. Općenito su faktori k manji od jedan, pa se razumljivost govora smanjuje. Mogu se postaviti ovi stupnjevi razumljivosti govora: uz slogovnu razumljivost od 85% do 96% razumljivost govora je vrlo dobra, uz 75%—85% razumljivost govora je dobra, uz 65—75% govor se može pratiti, ali s naporom, a uz manje od 65% razumljivost govora ne zadovoljava.

Na sl. 4.62. dijagramom je prikazana ovisnost slogovne razumljivosti o razini glasnoće u fonima. Zapažamo da se maksimalna slogovna razumljivost postiže uz glasnoću od 50 do 100 fona.



Sl. 4.62. Slogovna razumljivost ovisno o razini glasnoće



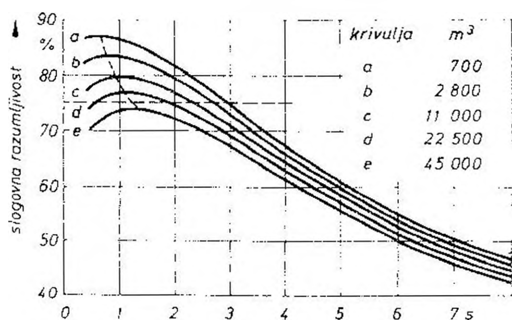
Sl. 4.63. Uz kratko vrijeme odjeka zvučni impulsi (slogovi) ostaju odijeljeni. Pri dugom vremenu odjeka susjedni se impulsi međusobno preklapaju.

Na glasnoću utječe vrijeme odjeka. Budući da na mjesto slušanja ne dolazi samo izravan nego i reflektiran zvuk, glasnoća se povećava. Uz preveliko vrijeme odjeka čuje se, međutim, osim sloga koji treba čuti još jedan ili više onih koji mu prethode, pa nastaje preklapanje slogova, dakle nerazumljivost. Sl. 4.63. objašnjava što se događa pri brzom, a što pri sporom utišavanju izgovorenog sloga.

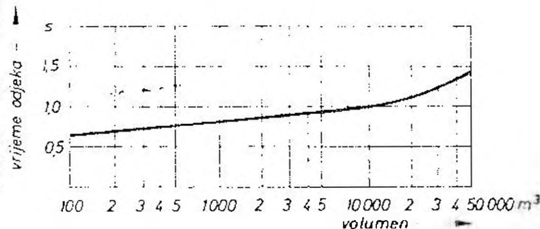
Vrijeme odjeka za govor može se dobiti i teorijski. Tonove koji do uha stignu u vremenskom razmaku manjemu od 0,1 s zbog svoje tromosti uho primi kao jedan ton. Ako je vremenska razlika veća, tonovi se čuju pojedinačno. Prema tome, onaj dio reflektiranog zvuka koji do uha dođe u 0,1 s nakon direktnog zvuka koristan je zvuk jer povećava glasnoću. Ostali dio reflektirana zvuka koji stigne poslije 0,1 s djeluje štetno jer ga uho prima onda kad već sluša drugi zvuk. Taj je dio zvuka nepoželjan, dakle je buka. Ispitivanja su pokazala da buka smanjuje slogovnu razumljivost u ovom iznosu: ako je po glasnoći jednaka korisnom zvuku, slogovna razumljivost iznosi 60%, ako je 4 fona niža, povisuje se slogovna razumljivost do 85%, a kad je 8 fona niža, postiže se slogovna razumljivost od 94%. Iz toga možemo zaključiti da štetan reflektirani zvuk treba da bude 4—8 fona ispod glasnoće korisna zvuka. Budući da tako velik pad glasnoće štetnog zvuka mora nastati unutar 0,1 s, izlazi da vrijeme odjeka (definirano padom intenziteta zvuka za 60 dB) u prostorijama za govor mora biti između $0{,}1 \cdot 60/8 = 0{,}75$ s do $0{,}1 \cdot 60/4 = 1{,}5$ s.

Knudsen je našao ovisnost slogovne razumljivosti o vremenu odjeka u prostorijama raznih volumena, i to prikazao dijagramom koji je na sl. 4.64. Prema

dijagramu, u manjim prostorijama vrijeme odjeka mora biti nešto manje od 1 s, a u većima nešto više od toga. Dijagram na sl. 4.65. prikazuje optimalno vrijeme odjeka za razne volumene prostorija.



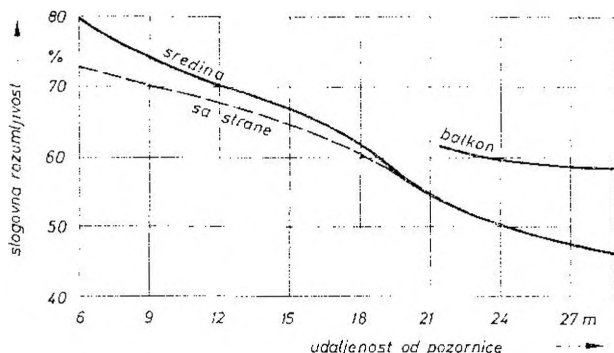
Sl. 4.64. Postotak slogovne razumljivosti ovisno o vremenu odjeka za dvorane različitih volumena. Iz dijagrama izlazi da se 75%-tna slogovna razumljivost (crtkana horizontala) ne može uopće postići u prostoriji kojoj pripada krivulja (e).



Sl. 4.65. Optimalno vrijeme odjeka za govor ovisno o volumenu prostorije

Knudsen je, dalje, izračunao slogovnu razumljivost u prostoriji od 11 000 m³ ovisno o vremenu odjeka, i to uz različite govornike. Iz tog računa izlazi da vrijeme odjeka treba da je to dulje što je glas tiši. Pri razglašavanju zvučnikom optimalno vrijeme odjeka približava se nuli. Tu valja napomenuti da ono koje je manje od 0,35 s uho ne čuje jer je njegovo vlastito „vrijeme odjeka" 0,35 s (vidi dijagram na sl. 2.39).

Buka koju je slušalac prisiljen slušati uz govor, bilo da se ona stvara u dvorani ili prodire izvana, pogoršava slušanje i smanjuje razumljivost. Dijagram ovisnosti faktora redukcije k_b o glasnoći buke sadrži sl. 6.5. Kako slogovna razumljivost ovisi o mjestu slušaoca u dvorani, vidi se na sl. 4.66. Taj dijagram otkriva da problem razumljivosti u velikim dvoranama ne zadaje akustičaru male teškoće.



Sl. 4.66. Slogovna razumljivost u nekoj dvorani na raznim mjestima i na različitim udaljenostima od pozornice

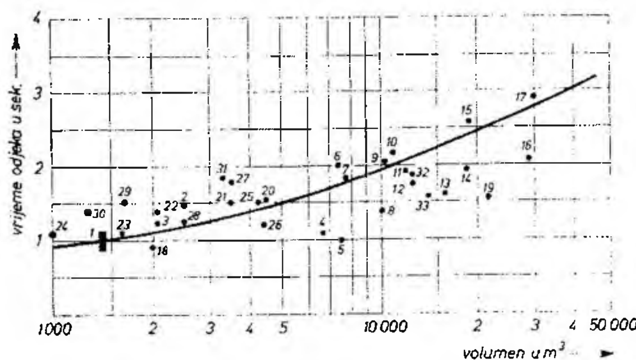
4.5.2. Muzička akustika prostorija

Vrijeme odjeka za glazbu odabire se prema drukčijem kriteriju nego za govor. Kod govora je, kao što smo vidjeli, glavni problem razumljivost, pa nam je odjek potreban samo utoliko što povećava glasnoću. Kod glazbe odjek je estetski problem, problem u vezi s ukusom slušatelja.

Na otvorenom prostoru orkestar zvuči loše, bezbojno. Tome je uzrok nagli pad glasnoće s udaljenošću, pa duboki tonovi prebrzo padnu ispod praga čujnosti. Time se gubi plastičnost što je daju duboki tonovi. U prostorijama je, naprotiv, zbog odjeka glasnoća dubokih tonova dovoljno velika i na stražnjim sjedalima, pa zvučnost orkestra dolazi do izražaja. Osim toga, odjek u opernim i koncertnim dvoranama daje izvedbi svečan karakter.

U muzici je problem odjeka vrlo složen. Iako se općenito može reći da je to problem glazbenog ukusa, na veličinu optimalnog vremena odjeka utječu i drugi činioci: *vrsta muzike, sastav orkestra, interpretacija dirigenta, vještina muzičara, glazbeno obrazovanje slušalaca* i, konačno, *tradicija* u vezi s akustičkim osobinama koncertnih dvorana.

Skladatelj komponira za određenu akustiku dvorane, te je svjesno ili nesvjesno unosi u svoja djela kao skladbeni element. Ima još sačuvanih dvorana u kojima su se izvodila djela velikih skladatelja starijeg doba. Osim toga, ima dvorana starije gradnje, koje su poznate po dobrim akustičkim svojstvima. Njihovo statističko ispitivanje poslužilo je kao polazna točka da se utvrdi optimalno vrijeme odjeka. Rezultati mjerenja su u dijagramu na sl. 4.67. Unesena su i vremena odjeka u dvoranama koje su građene u novije vrijeme. U prvi se mah ne bi moglo zaključiti da tu ima neke zakonitosti. Ako se, međutim, isključe ekstremne vrijednosti, koje su očita anomalija, zapaža se stanovita ovisnost vremena odjeka o volumenu dvorane. Ta se ovisnost može izračunati.



Sl. 4.67. Vrijeme odjeka na srednjim frekvencijama ovisno o volumenu kod dvorana koje su u akustičkom pogledu ocijenjene kao odlične. Ucrtana karakteristika daje vrijeme odjeka proporcionalno trećem korijenu iz volumena. Brojevi uz točke odnose se na dvorane: 1 — studio br. 3 u Danskom radio-domu (vrijeme odjeka promjenljivo); 2 — studio br. 2 u Danskom radio-domu; 3 — Altes Gewandhaus, Leipzig. 4 — Beethovensaal, Berlin; 5 — Staatsoper, Berlin; 6 — Gewandhaus, Leipzig; 7 — Halsingborg Concert Hall; 8 — Covent Garden, London; 9 — St. Margaret's, London; 10 — Festspielhaus, Bayreuth; 11 — Velika dvorana u zgradi The Gothenburg Concert House; 12 — Queen's Hall, London; 13 — Konzerthaus Beč; 14 — Filharmonija, Berlin; 15 — Crkva sv. Tome, Leipzig; 16 — Eastman Theatre, Rochester, New York; 17 — Crkva sv. Mihajla, Hamburg; 18 — Stenhammersalen, Gothenburg; 19 — Salle Pleyel, Pariz; 20 — studio br. 1, Zürich; 21 — studio br. 1, Ženeva; 22 — studio br. 1, Basel; 23 — studio br. 1, Lugano; 25 — Kilburn Hall, Rochester; 26 — Test Hall, Cambridge; 27 — Konzervatorij, Leipzig; 28 — Aeollian Hall, London; 29 — Holywell Concert, Oxford; 30 — Entrance Hall to Balls Park, Herts; 31 — David Memorial Hall, Uppingham; 32 — Free Trade Hall, Manchester; 33 — Coulston Hall, Bristol.

Radi jednostavnosti smatrat ćemo akustičkom kvalitetom odnos zvuka odjeka prema direktnom zvuku. Tim pojednostavnjenjem dobivamo da rezultat nije ovisan o geometrijskim osobinama dvorane. Gustoća zvučne energije na početku procesa odjeka bit će (vidi *Prilog* 3):

$$E_0 = \frac{4P}{cA} \tag{4.27}$$

Gustoća zvučne energije izravnog zvuka koju na udaljenosti R daje točkasti izvor jest, prema formuli (1.12):

$$E_d = \frac{P}{c4\pi R^2} \tag{4.28}$$

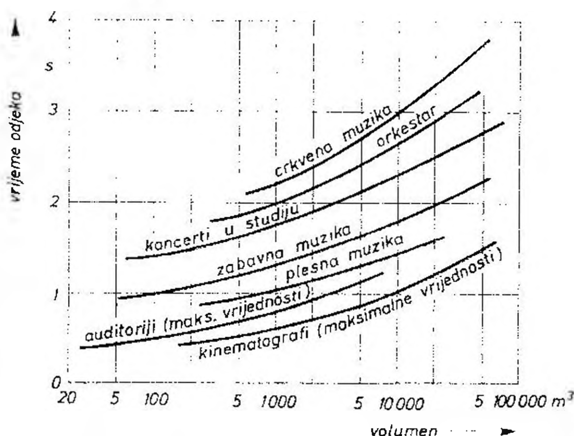
Odnos tih dviju gustoća energije daje:

$$\frac{E_o}{E_d} = \frac{16\pi R^2}{A} \tag{4.29}$$

Uvrsti li se za A vrijednost koja se dobiva iz Sabineove formule, izlazi:

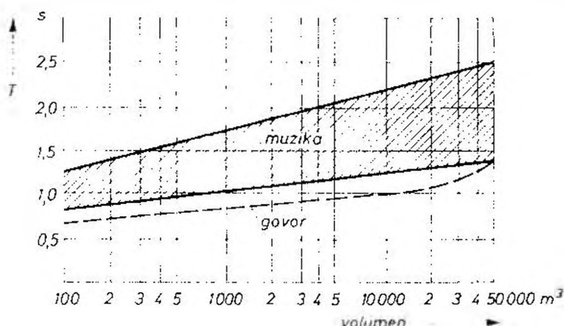
$$\frac{E_o}{E_d} = \frac{100\pi R^2 T}{V} \tag{4.30}$$

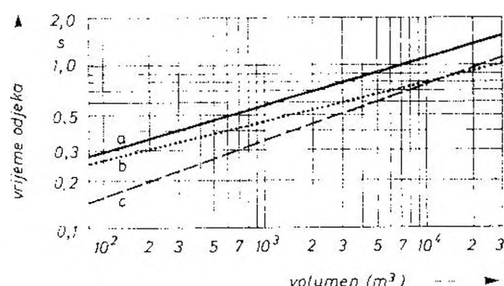
Ako pretpostavimo da taj odnos mora za pojedinu vrstu glazbe biti konstantan, i da udaljenost R od izvora do mikrofona ili slušatelja raste razmjerno duljini pojedine dvorane, dobivamo da vrijeme odjeka mora biti razmjerno $\sqrt[3]{V}$. Krivulja ucrtana na sl. 4.67. predočuje upravo takvu ovisnost vremena odjeka o volumenu. Na sl. 4.68. prikazana je ovisnost optimalnog vremena odjeka o volumenu za razne vrste glazbe.



Sl. 4.68. Ovisnost optimalnog vremena odjeka na srednjim frekvencijama o volumenu za različite vrste izvedbi

Radi potpunosti donosimo na sl. 4.69. još jedan prikaz te ovisnosti prema Knudsenu, kao i vrijeme odjeka za televizijske studije.





Sl. 4.69. Lijevo: optimalno vrijeme odjeka na srednjim frekvencijama ovisno o volumenu, prema Knudsenu. Desno: optimalno vrijeme odjeka za televizijske studije s maksimalnim vremenom odjeka između 500 i 2000 Hz (Burd, Gilford i Spring, 1966). Karakteristika (a) označuje najdulje prihvatljivo vrijeme odjeka, a (c) je najkraće vrijeme odjeka koje se uz određene uvjete može postići.

Matras je za optimalno vrijeme odjeka našao ovakvu ovisnost o volumenu:

U dvoranama za crkvenu muziku $T_{opt} = \frac{1}{10}\sqrt[3]{V}$ (4.31)

U koncertnim dvoranama $T_{opt} = \frac{9}{100}\sqrt[3]{V}$ (4.32)

U kazalištima i auditorijima $T_{opt} = \frac{7,5}{100}\sqrt[3]{V}$ (4.33)

Ako se u izrazu (4.32) za T_{opt} uvrsti vrijednost prema Sabineu, dakle $0,16\ V/\alpha S$, dobiva se:

$$\alpha_{opt} = \frac{16}{9}\frac{\sqrt[3]{V^2}}{S} \quad (4.34)$$

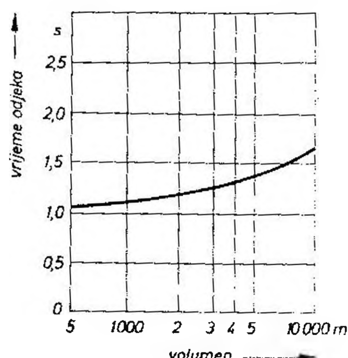
U dvoranama pravilna oblika približno je $\sqrt[3]{V}/S$ konstantan i iznosi 1/6, pa je optimalan faktor apsorpcije:

$$\alpha_{opt} = 0,3$$

Iz toga se može izvesti zanimljiv zaključak da je *uho zapravo osjetljivo na apsorpciju, a ne na odjek.*

Kad se određuje vrijeme odjeka za prostorije namijenjene za reprodukciju glazbe, ne smije se zaboraviti da je efekt odjeka već snimljen. Prema tome bi trebalo da odjek u dvorani za reprodukciju bude što kraći, kako se ne bi dodavao već snimljenom odjeku. U velikim dvoranama, npr. kinematografima, pojavljuje se problem raspodjele zvuka po svim sjedalima, dakle problem pojačanja zvuka odjekom.

Doduše, pomoću zvučnika lako se mijenja glasnoća, ali u suviše prigušenoj dvorani dobiva se uz normalnu glasnoću za prednje redove suviše niska glasnoća za stražnje redove, i obratno — ako stražnji redovi dobiju normalnu glasnoću, za prednje je zvuk preglasan. Zato se stanoviti odjek u velikim dvoranama za reprodukciju mora tolerirati. Dijagram na sl. 4.70. prikazuje kako pri tome optimalno vrijeme odjeka ovisi o volumenu.



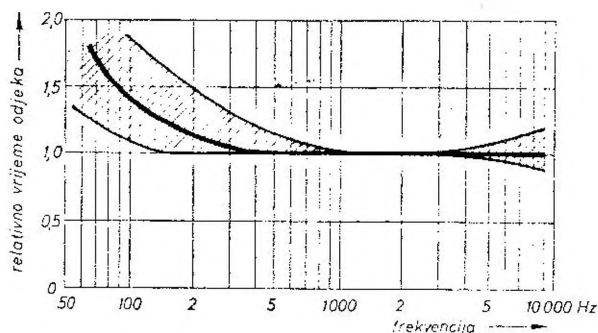
Sl. 4.70. Optimalno vrijeme odjeka ovisno o volumenu za kino-dvorane

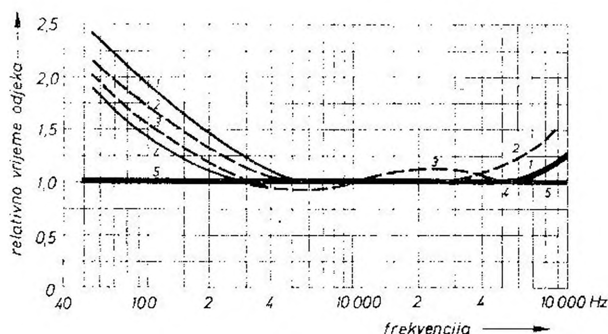
4.5.3. Frekvencijska karakteristika odjeka

Sva naša dosadašnja razmatranja o optimalnom vremenu odjeka odnosila su se na područje srednjih frekvencija, ili na frekvenciju od 512 Hz. Iako se ne smatra pogrešnim da vrijeme odjeka bude jednako na svim frekvencijama, ipak mnogi autori preporučuju drukčiju frekvencijsku karakteristiku odjeka.

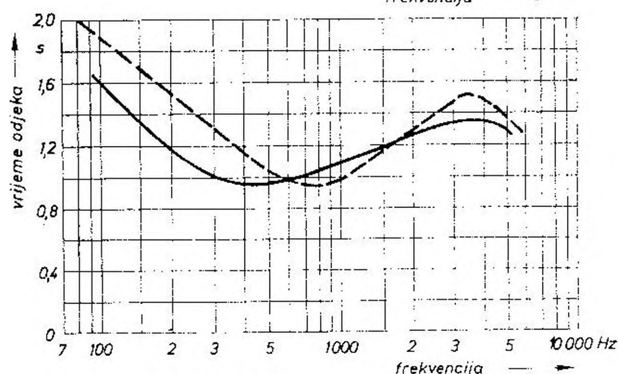
Na sl. 4.71. iscrtkana površina predočuje plohu sa svim frekvencijskim karakteristikama koje na temelju svojih istraživanja preporučuju razni autori. Kao što se vidi, gotovo se svi slažu u tome da u području sasvim niskih frekvencija vrijeme odjeka treba da bude veće. Već sama velika iscrtkana površina u tom frekven-

cijskom području dokazuje da vrijeme odjeka ispod 500 Hz nije kritično. No zato između 500 i 2000 Hz već i male promjene karakteristike znatno utječu na glazbenu kvalitetu. Opadanje vremena odjeka iznad 3000 Hz ne može se spriječiti, tako da tu utjecaj promjene vremena odjeka na muzičku kvalitetu nije poznat. Neka ispitivanja otkrila su, opet, da je opadanje krakteristike iznad 3000 Hz poželjno.





Sl. 4.71. Gore: u iscrtkanom području frekvencijske su karakteristike što ih preporučuju razni autori. Dolje: frekvencijske karakteristike vremena odjeka prema autorima: 1 — MacNair, 1930; 2 — Morris i Nixon, 1963; 3 — Danski radio-dom, 1942; 4 — Rickmann i Heyda, 1940; 5 — Békésy, 1943.



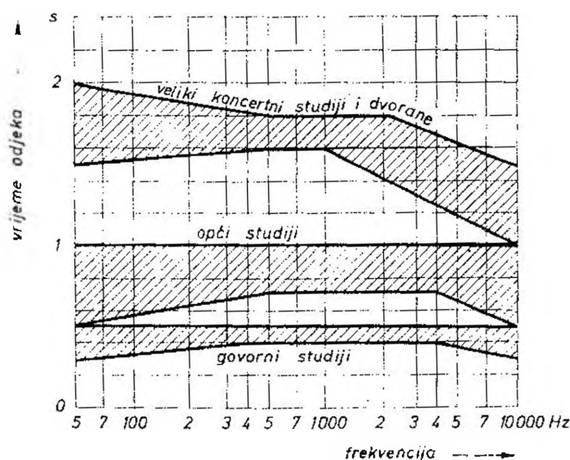
Sl. 4.72. Frekvencijske karakteristike vremena odjeka u studiju br. 3 u Danskom radio-domu. Uz vrijeme odjeka prema punoj liniji dobiven je dobar rezultat, a prema crtkanoj rezultat je bio loš.

Zanimljiva su iskustva što su ih stekli danski akustičari s frekvencijskom karakteristikom vremena odjeka u muzičkom studiju volumena od 1 500 m^3, kojemu se frekvencijska karakteristika vremena odjeka mogla mijenjati. Vrlo povoljnom pokazala se ona s najnižom vrijednošću vremena odjeka između 300 i 500 Hz (sl. 4.72). Porast vremena odjeka u tom području loše je djelovao na muzičku kvalitetu.

Općenita pravila u vezi s frekvencijskom karakteristikom odjeka u radio-studijima mogla bi biti ova:

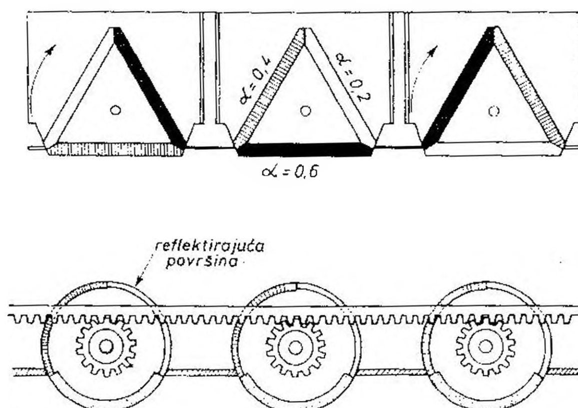
1. u govornim studijima, koji su redovito maleni, preporučuje se smanjiti vrijeme odjeka u području dubokih tonova;
2. u studijima za zabavnu glazbu preporučuje se smanjiti vrijeme odjeka u području visokih tonova;
3. u velikim studijima za simfonijsku glazbu treba vrijeme odjeka prema dubokim tonovima da raste, utoliko brže, što je dvorana veća.

Beranek je sumirao evropska i američka iskustva o vremenu odjeka i prikazao ih dijagramom (sl. 4.73). Zapažamo da odstupanja u vremenu odjeka unutar ± 30% nisu kritična.

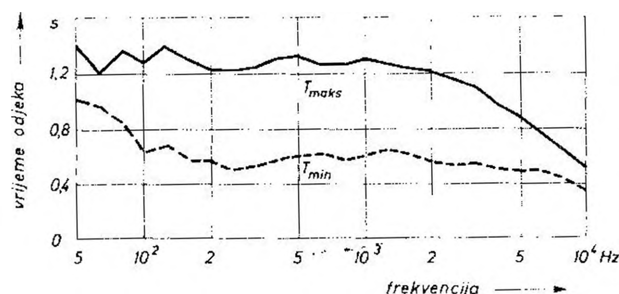


Sl. 4.73. Vrijeme odjeka ovisno o frekvenciji, prema Beraneku

Na osnovi svega toga opći je zaključak da se jednako kao za vrijeme odjeka općenito i za njegovu frekvencijsku karakteristiku može reći da njezin optimalan oblik ovisi o raznim činiocima — o volumenu prostorije, vrsti glazbe, sastavu orkestra itd. Velika je prema tome prednost kad se može mijenjati vrijeme odjeka, kao što se to katkad prakticira u radiostudijima (sl. 4.74. i 4.75).



Sl. 4.74. Promjenljivo vrijeme odjeka dobiva se uređajima pomoću kojih se prema dvorani okreću površine s različitim koeficijentima apsorpcije.



Sl. 4.75. **Maksimalno i minimalno vrijeme odjeka u jednom radio-studiju s promjenljivom akustikom.**

4.5.4. Primjeri koeficijenta apsorpcije

Frekvencijska karakteristika odjeka stanovita oblika dobiva se tako da se plohe prostorije oblože materijalima koji imaju određene frekvencijske karakteristike koeficijenata apsorpcije. Pri tome, dakako, treba uračunati i frekvencijske karakteristike koeficijenata apsorpcije normalnih građevnih materijala i elemenata, te publike.

Tablica 4.2.

Građevni elementi	Koeficijent apsorpcije		
	200 Hz	500 Hz	1 000 Hz
Glatka žbuka na opeci ili betonu	0,01	0,02	0,02
Ovješen gladak sadren strop	0,2	0,1	0,05
Zidna obloga, daske ili ploče od drvenih vlakanaca na rešetki od letava	0,3	0,2	0,1
Parket položen na asfalt	0,04	0,07	0,06
Pod s tvrdim pokrivačem (drvo, pluto, guma)	0,03	0,04	0,05
Sag srednje debljine	0,08	0,2	0,3
Zastor srednji	0,15	0,3	0,4
Zastor teški, 9 cm od zida	0,1	0,38	0,63
Akustik-ploče, 2 cm debljine, nalijepljene	0,15	0,4	0,6
Akustik-ploče, 2 cm debljine, na rešetki od letava	0,3	0,6	0,7
Prozor	0,3	0,18	0,12
	m^2	m^2	m^2
Publika (m^2 po osobi) stoji, ili sjedi na drvenim stolcima	0,3	0,47	0,52
Publika (m^2 po osobi) na tapetiranim stolcima	0,4	0,55	0,6
Stolci sami, drveni	0,01	0,02	0,03
Stolci tapetirani tkaninom	0,3	0,35	0,45
Stolci obloženi umjetnom kožom	0,25	0,45	0,35
Glazbenik s instrumentom	0,7	1,15	1,4

U tablici donosimo koeficijente apsorpcije nekih najvažnijih elemenata koji se pojavljuju u akustici prostorija. Te vrijednosti nisu apsolutne jer, kao što ćemo vidjeti, one ovise o načinu mjerenja, o načinu postavljanja apsorpcijskih elemenata i o drugim činiocima. Računanje pomoću tih srednjih vrijednosti koeficijenata apsorpcije daje, međutim, rezultate dovoljno točne za najčešće primjere na koje se nailazi u praksi.

4.5.5. Primjer proračunavanja vremena odjeka

Kad se neka veća dvorana akustički projektira, potrebno je proračunati vrijeme odjeka. Ako se rezultat mnogo udaljuje od optimalne vrijednosti, projekt se mora izmijeniti. Budući da vrijednosti koje se navode za koeficijente apsorpcije mogu odstupati i do ± 20% od stvarne vrijednosti, tj. one dobivene u praktičkoj upotrebi, nije potrebno pojedine površine u prostoriji izračunavati, odnosno mjeriti na m^2 točno. Proračun vremena odjeka koristan je i zbog toga što se tom prilikom može uočiti koji su elementi akustički važniji, te se u posebnom slučaju eventualno izmjeri koeficijent apsorpcije.

Proračun ćemo izvesti za koncertnu dvoranu volumena od 10000 m^3, sa 1250 mjesta za publiku. Specifični volumen iznosi, dakle, 8 m^3 po osobi. Račun je proveden s vrijednostima koeficijenata apsorpcije navedenima u tablici 4.3.

Tablica 4.3.

	Apsorpcija u m^2		
	200 Hz	500 Hz	1000 Hz
900 m^2 ovješenoga sadrenog stropa	180	90	45
900 m^2 drvene obloge na zidovima	270	180	90
700 m^2 glatke žbuke na zidovima	7	14	14
700 m^2 parketa položenoga na asfalt	28	49	42
200 m^2 saga	16	40	60
1250 stolaca obloženih tkaninom	375	440	562
Totalna apsorpcija bez publike i orkestra	876	813	813
1250 osoba (razlika s obzirom na prazne stolce)	125	250	188
100 muzičara u orkestru	70	115	140
Totalna apsorpcija s publikom i orkestrom	1061	1178	1141

Računajući prema Sabineovoj formuli dobiva se vrijeme odjeka:

	f:	200	500	1000 Hz
Prazna dvorana	T:	1,8	2,0	2,0 s
Dvorana s publikom i orkestrom	T:	1,5	1,4	1,4 s

4.6. PROSTORIJE RAZNIH VELIČINA IMAJU SVOJE SPECIFIČNE AKUSTIČKE PROBLEME

U arhitekturi se nailazi na prostorije najrazličitijih veličina, od vrlo malih, npr. od 2 m^3, kao što su telefonske kabine, pa do izvanredno velikih od 50000 m^3, kao što su kina i koncertne dvorane. Prema akustičkim specifičnostima dijele se prostorije u tri skupine:

1. prostorije srednje veličine, koje karakterizira *homogenost zvučnog polja*;
2. velike dvorane, kojih je posebna karakteristika *nehomogenost zvučnog polja* zbog jeke (ili drugih nedostataka u vezi s oblikom prostorije);

3. male prostorije ili sobe, kojih su posebna karakteristika *istaknute vlastite frekvencije.*

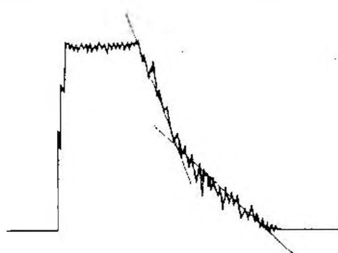
Sabine je istraživao u dvoranama srednje veličine. Zato se njegova formula može upotrijebiti samo za prostorije takve veličine jer je u njima uglavnom ispunjen osnovni uvjet da je zvučna energija jednoliko raspodijeljena i zvuk u dvorani homogen, i u stacionarnom stanju i za vrijeme odjeka.

U poglavlju u kojem smo razložili metodu Sabineova istraživanja spomenuli smo rezultate do kojih je on došao:

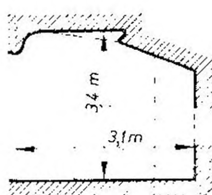
a) opadanje zvučne energije u prostoriji eksponecijalna je funkcija vremena;
b) opadanje glasnoće linearna je funkcija vremena;
c) nagib karakteristike odjeka mjera je akustičke kvalitete dvorane;
d) brzina utišavanja zvuka jednaka je za sva mjesta u dvorani;
e) brzina opadanja glasnoće ne ovisi o položaju izvora;
f) vrijeme odjeka nije ovisno o položaju apsorpcijskih površina.

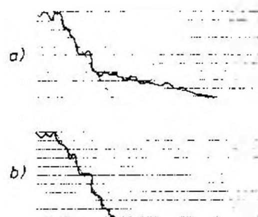
Ti Sabineovi zakoni ne vrijede već ni za dvorane srednje veličine. Na primjer, muzičari se ne postavljaju blizu slušalaca, niti slušatelji smiju biti blizu zida.

U većini je dvorana dodan balkon da se poveća broj sjedala. Zbog niskog stropa iznad balkona i ispod njega vrijeme odjeka na tim je mjestima kraće. Tad zvuk nije jednoliko raspodijeljen po dvorani. Mjereći odjek ispod balkona i na njemu dobiva se karakteristika s dva nagiba: početni, veći nagib odnosi se na prigušeniji prostor, a manji nagib na manje prigušen prostor ostalog dijela dvorane (sl. 4.76). Može se postaviti pitanje koji se dio karakteristike u dvorani „iskorišćuje", odnosno koji dio utječe na njezinu akustičku kvalitetu. Obično se smatra da akustičke osobine prostorije ovise o tome kolik je nagib njezine karakteristike odjeka na dijelu od početnih 20 dB.



Sl. 4.76. Akustička kvaliteta prostorije ovisi o tome koliki nagib ima početni dio karakteristike odjeka.





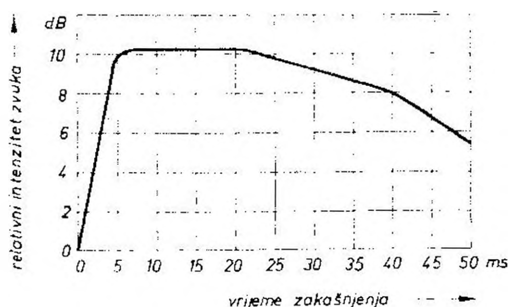
Sl. 4.77. Presjek prostorije u kojoj je postojala flater-jeka, što su prikazivala dva različita nagiba krivulje na slici a). Kad je spušten strop u kosi položaj, flater-jeka je nestala, što prikazuje i krivulja na slici b).

Dvostruk nagib karakteristike odjeka može biti znak flater-jeke. Na sl. 4.77. vertikalan je presjek prostorije, u kojoj zbog toga što je strop jednim dijelom paralelan s podom, nastaje flater-jeka. Nakon skošenja stropa flater-jeke je nestalo, a to se vidi i iz karakteristike odjeka.

Krivulja odjeka gotovo nikad nije pravac, već više ili manje nazubljena linija. Razlog za tu pojavu treba tražiti u nejednolikoj raspodjeli apsorpcijskih površina u dvorani. Mala odstupanja znače prednost jer tonu daju mekoću. Opadanje po pravcu, dakle potpuno eksponencijalno opadanje, čini ton tvrdim i suhim.

U vrlo velikim dvoranama može reflektirani zvuk toliko zakasniti za direktnim da se oba čuju posebno. Te pojave istraživao je *Haas*. Prikazat ćemo njegove rezultate. Ako dva različita izvora zvuka emitiraju uz jednak intenzitet isti zvučni pro-

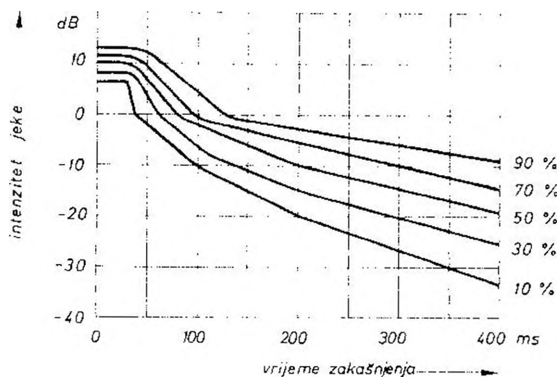
gram, i ako oba istodobno stižu do slušatelja, za njega zvuk nastaje negdje između oba izvora. Ali, zakašnjava li jedan od tih zvukova 5—35 ms prema drugome, slušatelj čuje samo jedan zvuk, i to onaj koji ne kasni. Uz zakašnjenje od 35—50 ms slušatelj čuje i drugi zvuk, ali mu je smjer onaj odakle stiže nezakašnjeli zvuk. Ako je zakašnjenje veće od 50 ms, sekundarni se zvuk čuje kao jasna jeka. Opisani efekt ne ovisi o položaju izvora zakašnjela zvuka. Porast glasnoće razmjeran je povećanju zvučne snage, pa je veći, dakle, za 3 dB prema pojedinačnom zvuku. Haas je našao da uz zakašnjenje od 5—35 ms može sekundarni, tj. zakašnjeli zvuk, biti i do 10 dB glasniji nego primarni pa da ga slušatelj ipak ne čuje (sl. 4.78).



Sl. 4.78. Dijagram prikazuje za koliko decibela treba da je zakašnjeli impuls većeg intenziteta da bi se čuo jednako glasno kao izravni impuls.

Efekt koji je otkrio i istražio Haas naziva se i *zakon prvoga valnog čela.* Sluh ima osobinu da između više zvučnih izvora koji emitiraju isti zvučni program čuje samo onaj kojega valovi najprije stignu do uha.

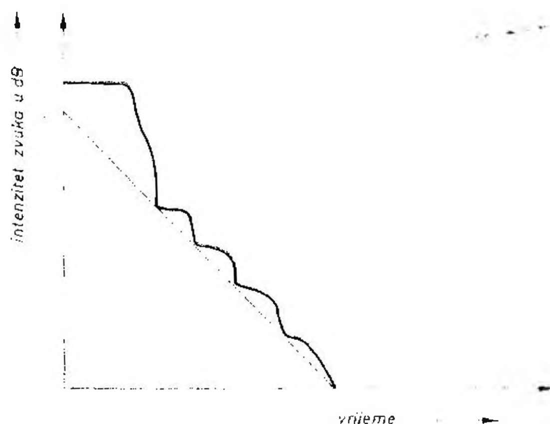
Zvuk koji kasni više od 50 ms kvari prirodnost i razumljivost govora. *Doak* i *Bolt* su proučavali kojem postotku slušalaca u nekom auditoriju smeta zakašnjenje zvuka uz određene relativne intenzitete. Doak-Boltove krivulje na sl. 4.79. mogu poslužiti kao kriterij za procjenu osobina dvorane na tranzijentni akustički odziv. Smatra se da se faktor smetanja od 15 do 20% može dopustiti.



Sl. 4.79. Kriterij prema Boltu i Doaku za tranzijentni akustički odziv prostorija. Na primjer, ako kašnjenje jeke za grupu slušatelja iznosi 400 ms, a razina je jeke 20 dB niža od razine direktnog zvuka, onda će jeka smetati polovici slušalaca.

Haasovi rezultati odnose se na pojedinačnu jeku, i to u vezi s govorom. U velikim dvoranama poslije izravnog zvuka dolazi mnogo refleksija. Tad zakašnjeli zvuk manje smeta nego što to izlazi iz krivulja.

U *vrlo velikim dvoranama* krivulja odjeka poprima svoj specifičan oblik. Kao što se vidi na sl. 4.80, u početku nema utišavanja, već zvuk neko vrijeme zadržava svoj početni intenzitet. Vrijeme zadržavanja intenziteta ovisi o mjestu na kojem se mjeri i o dimenzijama dvorane. Nakon toga naglo pada intenzitet za nekoliko decibela. Tek nakon što do mikrofona (ili slušaoca) stignu prvi odrazi, krivulja ima oblik kao u dvoranama srednje veličine.



Sl. 4.80. Krivulja odjeka u vrlo velikim prostorijama

Želimo li računati vrijeme odjeka za vrlo veliku dvoranu, treba upotrijebiti Millingtonovu formulu. Prilikom mjerenja vremena odjeka na raznim mjestima u dvorani može se ustanoviti da su znatne razlike u rezultatima. No ta disperzija odjeka ne može se izbjeći.

Iz svega se zaključuje da je projektiranje velikih dvorana kompleksan problem za koji su prijeko potrebni pokusi na modelima.

U tvorničkim halama u kojima nema apsorpcijskih sredstava, za vrijeme odjeka na srednjim frekvencijama približno vrijedi:

$$T = 0,5 \sqrt[3]{V} \text{ (s)} \qquad (4.35)$$

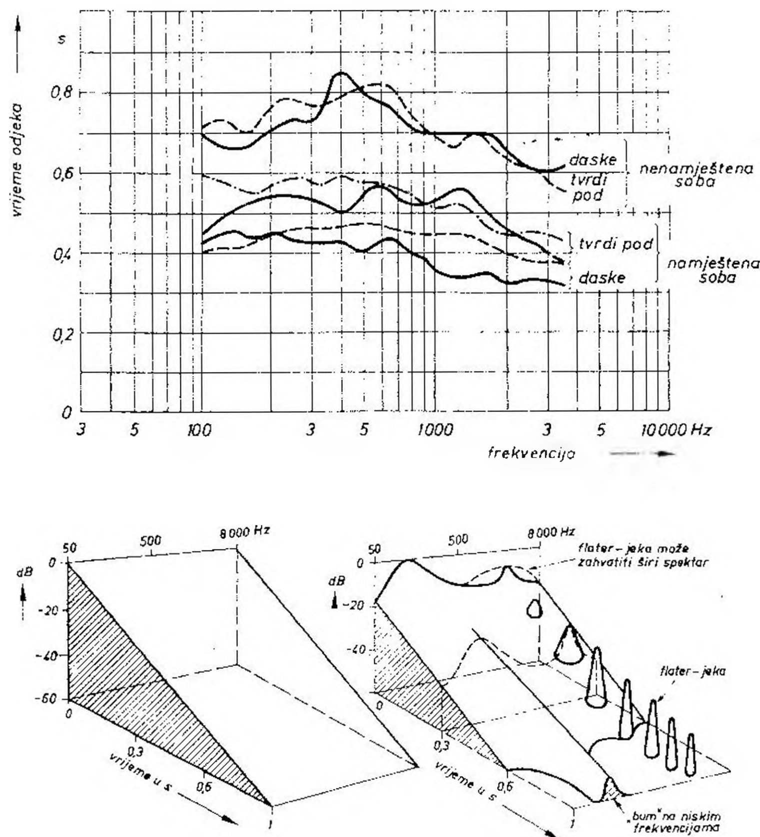
T se dobiva u sekundama ako se volumen hale V uvrsti u m^3. Prema visokim frekvencijama vrijeme odjeka opada.

Kad je riječ o *malim prostorijama*, možda bi se u prvi mah moglo pomisliti da se one akustički projektiraju bez teškoća. Sjetimo se međutim, kako smo prije izložili da je odjek zvučno istitravanje na prirodnim frekvencijama. Kad bi izravan zvuk u malim prostorijama i bio difuzan, za vrijeme odjeka koncentrirao bi se zvuk u uske pojasove oko prirodnih frekvencija, a utišavanje bi ovisilo o apsorpciji za svaki pojedini način titranja. Čak i onda kad je apsorpcijski materijal jednoliko raspoređen po prostoriji, utišavanje će biti za svaki od tri načina titranja drukčije jer apsorpcija ovisi o kutu upada zvuka.

Prije smo uočili i to da dva načina titranja koja su bliza daju interferentne pojave, što se u velikim prostorijama može zanemariti.

U velikim prostorijama vlada potpuna difuznost zvuka i u području niskih frekvencija, a u malima je tu frekvencijski spektar diskontinuiran. To i jest razlog

zašto se u malom prostoru ne može dobiti „zvuk velike dvorane". Akustička problematika malih prostorija pojavljuje se i u sobama za stanovanje. To se vidi iz dijagrama vremena odjeka na sl. 4.81.



Sl. 4.81. Gore: tipične frekvencijske karakteristike vremena odjeka u normalnim sobama za stanovanje. Dolje: idealna i moguća stvarna karakteristika vremena odjeka u studiju

Iz svega što je izloženo može se zaključiti da vrijeme odjeka prostorije ne valja uzimati kao jedini i dovoljni kriterij na osnovi kojega se prosuđuju akustičke osobine prostorije. U vezi s tim problemom *V. L. Mankovsky* je u sedam točaka iznio posebna upozorenja:

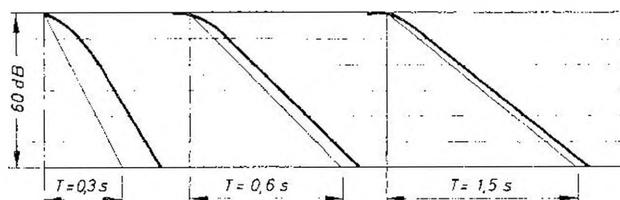
1. Vrijeme odjeka ovisi o volumenu prostorije, površini njezinih unutarnjih ploha i o srednjem koeficijentu apsorpcije. No, na njega utječe i apsorpcija zraka u prostoriji, oblik prostorije i mjesto izvora zvuka te razmještaj apsorpcijskih materijala.
2. Vrijeme odjeka u nekoj prostoriji nije konstantno na svim frekvencijama jer apsorpcija zraka i ploha ovisi o frekvenciji.
3. Za praktičke potrebe dobro je da se vrijeme odjeka izračunava za frekvencije niže od 4000 Hz.

4. Kad se izračunava vrijeme odjeka u malim prostorijama, može se zanemariti utjecaj zračne apsorpcije.
5. Ako se računa vrijeme odjeka za velike prostorije, ne smije se ispustiti apsorpcija zraka ali samo za frekvencije od 2000 do 4000 Hz.
6. Vrijeme odjeka se jednostavnije izračunava ako srednji koeficijent apsorpcije ne premašuje vrijednost od 0,2. Tad je prikladna klasična Sabineova formula.
7. Budući da vrijeme odjeka nije apsolutni i jedini kriterij za ocjenu akustičkih osobina prostorije, valja — da bi se isključile moguće pogreške — za svaki poseban slučaj upotrijebiti ispravnu formulu, uz razumijevanje fizikalnih principa.

4.7. ELEKTRIČKI I AKUSTIČKI SPOJENE PROSTORIJE

Najčešći primjer električki spojenih prostorija je radio-studio i soba u kojoj se sluša radio-emisija. U principu bi trebalo ostvariti da soba za prijem emisije ne dodaje svoj odjek onome iz studija; ona bi morala biti jako prigušena. Međutim, tad bi slušalac slušao samo izravan zvuk iz zvučnika, a to djeluje neprirodno. Stoga soba za reprodukciju treba da ima stanovit malen odjek, kao što ga, uostalom, ima svaka soba za stanovanje.

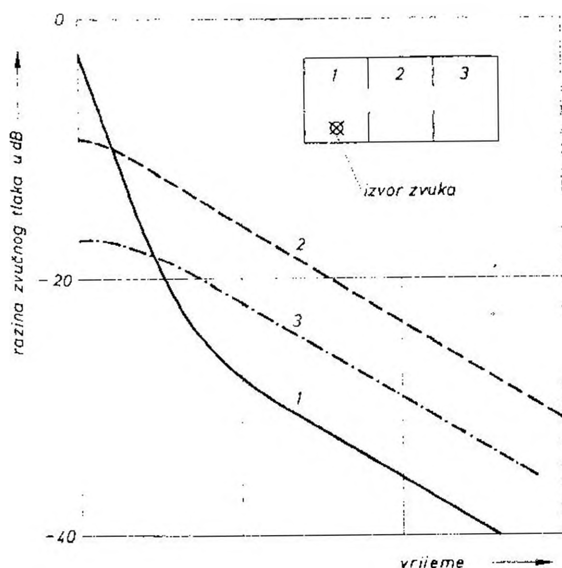
Dojam koji dobivamo slušajući u svojoj sobi spikera ovisi o tome kakav je odjek u studiju. Ako je vrijeme odjeka u studiju kratko, čini se kao da spiker govori u sobi. Pri velikom vremenu odjeka u studiju slušaču će se pričiniti kao da je i on u studiju. Povežu li se električki dvije prostorije u kojima je proces odjeka eksponencijalan, dobiva se neeksponencijalan rezultantan proces. To se vidi na sl. 4.82, gdje su karakteristike u svom gornjem dijelu manjeg nagiba nego poslije. Na slici se također zapaža da je električkom vezom dobiveno produženje vremena odjeka u odnosu prema duljemu pojedinačnom vremenu odjeka to veće što su pojedinačna vremena odjeka bliža. Osim toga kad su vremena odjeka vrlo različita, rezultantno vrijeme odjeka bit će, praktički, jednako duljemu pojedinačnom vremenu odjeka, i još je k tome opadanje eksponencijalno.



Sl. 4.82. Računski dobivene krivulje odjeka uz konstantno vrijeme odjeka od 0,4 s u prijemnoj prostoriji, i uz vrijeme odjeka u studiju od 0,3 s, 0,6 s i 1,5 s

Na temelju izloženoga može se zaključiti da se *emisijom iz vrlo prigušenog studija ne može postići efekt otvorena prostora.* Budući da soba za reprodukciju ima stanovit odjek, on prevladava, pa se efekt otvorena prostora gubi.

Ako je više prostorija medusobno akustički vezano, krivulja odjeka svake od njih dobiva specifičan oblik. Na sl. 4.83. načelan je tok tih krivulja. Prva se odnosi na prostoriju u kojoj je izvor zvuka. Ona ima dva nagiba, što je karakteristično za



prostoriju koja ima dva dijela s različitim akustičkim svojstvima. U drugoj prostoriji krivulja odjeka počinje blagim nagibom, a tek poslije ona prelazi u nagib koji predočuje odječnu karakteristiku te prostorije. Krivulja koja vrijedi za treću prostoriju — najudaljeniju od izvora — počinje nultim nagibom.

Sl. 4.83. Načelne krivulje odjeka u akustički spojenim prostorijama

4.8. MJERENJE AKUSTIČKE KVALITETE PROSTORIJA

Osnovne akustičke osobine neke prostorije mogu se ocijeniti na osnovi vremena odjeka. Ima, međutim primjera, što smo već spomenuli, da su dvije prostorije istog vremena odjeka za slušaoca sasvim različitih akustičkih karakteristika. Iz toga izlazi da vrijeme odjeka nije podatak koji u svemu karakterizira prostoriju. Potrebno je mjeriti i neke druge veličine zvučnog polja. To mogu biti fluktuacije intenziteta zvuka u toku odjeka, zvučni tlak na raznim mjestima prostorije, odnos direktnog zvuka prema zvuku odjeka itd. Rezultati svakog od tih mjerenja mogu dati korisne informacije o akustičkim osobinama prostorije.

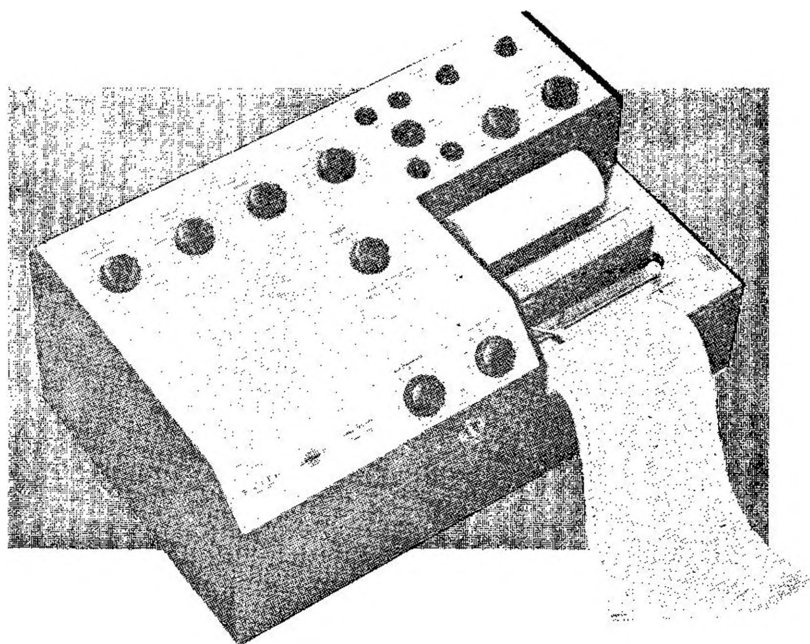
U današnjoj akustičkoj praksi izvode se u prostorijama ova tehnička mjerenja:

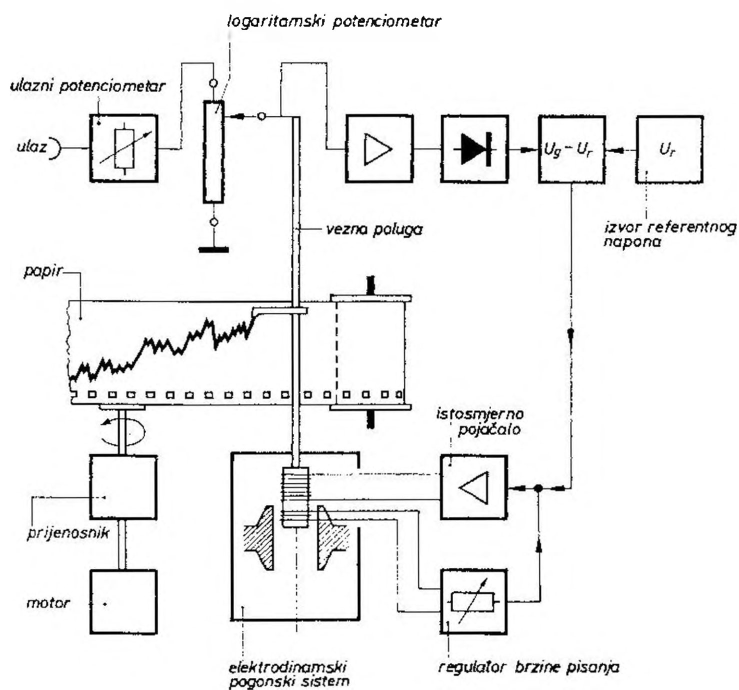
1. snimanje karakteristike koja prikazuje ovisnost vremena odjeka o frekvenciji;
2. snimanje karakteristika odjeka uz promjenljivu frekvenciju koja se mijenja kontinuirano;
3. mjerenje zvučnog tlaka na raznim mjestima u dvorani;
4. mjerenje usmjerne raspodjele zvučnih refleksija;
5. oscilografiranje izravnoga zvučnog impulsa i njegovih odraza u vremenskom slijedu.

4.8.1. Mjerenje vremena odjeka

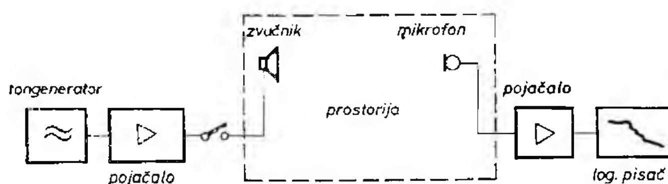
Gruba orijentacija o duljini vremena odjeka može se dobiti na ovaj način: pljeskom dlanova proizvede se u prostoriji zvuk, a štopericom se izmjeri vrijeme koje proteče dok zvuk padne na prag čujnosti.

Vrijeme se odjeka točno mjeri pomoću *logaritamskog pisača* (sl. 4.84). Ulazu takva pisača privodi se pojačani mikrofonski napon. Kad taj napon poremeti ravno-





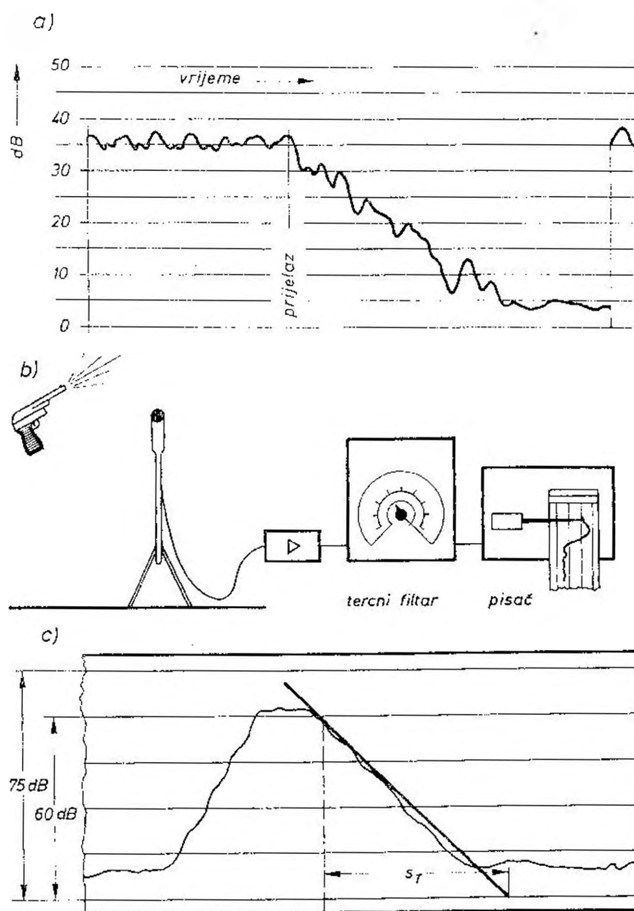
Sl. 4.84. Logaritamski pisač — vanjski izgled i principna shema



Sl. 4.85. Shema mjerenja vremena odjeka

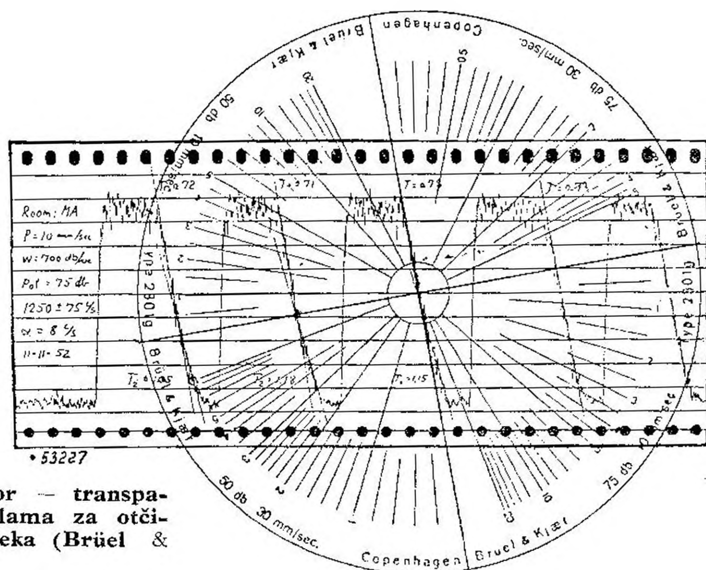
težu u izlaznom stupnju, poteče kroz pokretnu zavojnicu istosmjerna struja jednog ili drugog smjera. Tom strujom dobivena elektrodinamička sila miče zavojnicu i, s njom, klizač logaritamskog potenciometra sve dotle, dok se ravnoteža ponovno uspostavi. Zajedno s pokretnom zavojnicom i klizačem potenciometra vezana je pisaljka koja na papiru što se kreće jednolikom brzinom upisuje svoj trag. Pisačem se može pratiti brzina od 1000 dB u sekundi.

Vrijeme odjeka u principu se mjeri na način prikazan shemom na sl. 4.85. Tonfrekvencijski napon određene frekvencije privodi se pojačalu snage i zvučniku. Mikrofonom primljen signal dolazi preko pretpojačala u logaritamski pisač.



Sl. 4.86. Tipična krivulja odjeka snimljena logaritamskim pisačem

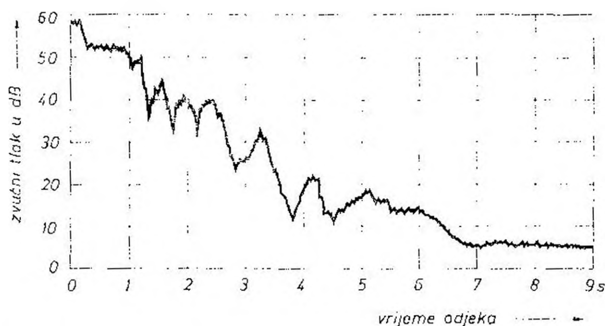
Kad se prekine veza između pojačala i zvučnika, mikrofon prima samo signal sadržan u odjeku. Na sl. 4.86. predočena je tipična karakteristika odjeka. Iz nje se vrijeme odjeka dobije tako da se nacrta pravokutan trokut kojemu je hipotenuza karakteristika odjeka aproksimirana pravcem, vertikalna kateta pravac koji prikazuje opadanje zvučnog tlaka za 60 dB, a vodoravna kateta put je papira koji odgovara opadanju zvučnog tlaka za 60 dB. Zatim se iz poznate brzine papira i duljine horizontalne katete nađe vrijeme odjeka.



Sl. 4.87. Protraktor – transparentna ploča sa skalama za otčitavanje vremena odjeka (Brüel & Kjaer)

Kao što se lako može zaključiti, uz određenu brzinu papira nagib karakteristike mjera je vremena odjeka. Stoga se za otčitavanje vremena odjeka mogu upotrijebiti prozirne celuloidne šablone sa zrakasto ucrtanim linijama, gdje svakoj liniji odgovara (uz stanovitu brzinu papira) određeno vrijeme odjeka (sl. 4.87).

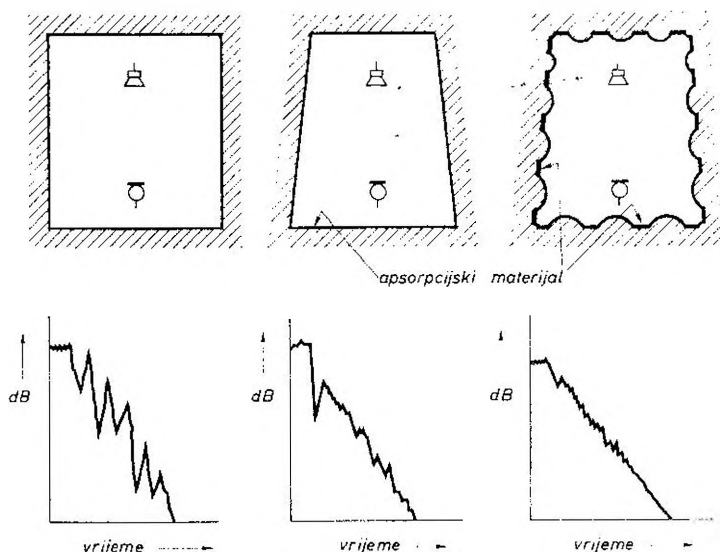
Često se događa da zbog buke nije moguće snimiti donji dio karakteristike odjeka jer ona poslije pada od tridesetak decibela prijeđe u horizontalu. Budući da za ocjenu akustičke kvalitete prostorije treba imati karakteristiku odjeka na razlici razina od barem 45—50 dB, valja se pobrinuti ili da početna razina bude viša ili da se ukloni utjecaj buke. Kako je podizanje početne razine glasnoće skupo (prijelazom sa 10-vatnog zvučnika na 100-vatni podiže se intenzitet zvuka samo za 10 dB), ostaje jedino da se što više snizi napon buke iza mikrofona. To se postiže selektivnim mikrofonskim pojačalom koje propušta samo uzak pojas oko mjerne frekvencije u širini jedne trećine oktave.



Sl. 4.88. Tipična krivulja odjeka dobivena mjerenjem pomoću čistog tona

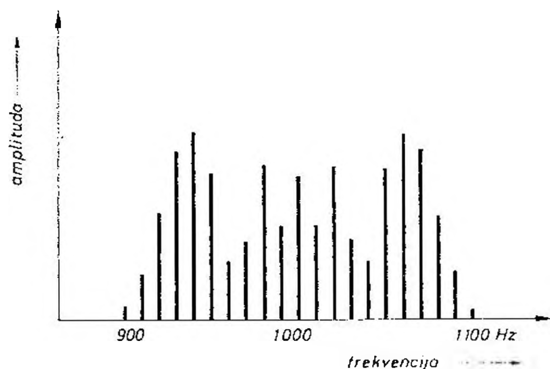
Snimajući karakteristike odjeka pomoću jedne frekvencije, dakle pomoću čistog tona, često se ne dobivaju upotrebljivi razultati. To se dobro vidi iz karakteristike na sl. 4.88. Zbog interferencije između različitih načina titranja na prirodnim frek-

vencijama prostorije, proces odjeka vrlo je nepravilan, pa je gotovo nemoguće povući pravac koji bi svojim nagibom bio mjera za vrijeme odjeka. U prostorijama gdje je difuznost zvuka mala redovito nastaju takve teškoće. Sl. 4.89. predočuje kako karakteristika odjeka mjerena jednim tonom postaje to pravilnija, što je difuznost zvuka u prostoriji veća.



Sl. 4.89. Krivulje odjeka u prostorijama različita oblika i s različitom apsorpcijom stijena

Međutim, i u prostorijama u kojima difuznost zadovoljava nije pogodno mjeriti jednim tonom jer ipak na nekim niskim frekvencijama mogu nastati interferentne pojave i, zbog toga, nepravilnosti krivulje odjeka. Više-manje „glatka" karakteristika odjeka dobiva se mjerenjem pomoću *frekvencijski moduliranog tona.* Takvom modulacijom postiže se diskontinuiran pojas tonova kakav u spektralnom prikazu sadrži sl. 4.90. Najpovoljniji rezultat, tj. najlinearnija karakteristika odjeka, dobiva se onda kad je na nižim frekvencijama širina spektra jednaka šestini oktave,



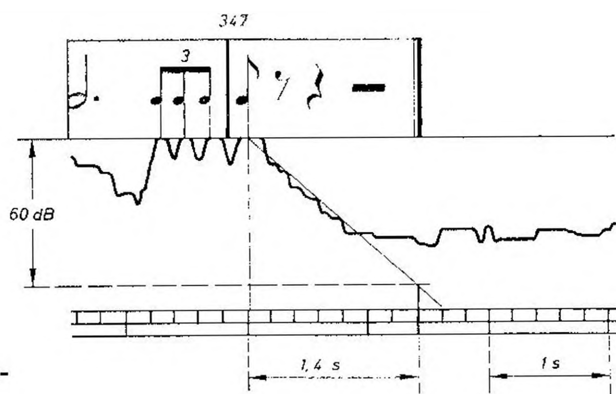
Sl. 4.90. Spektar frekvencijski moduliranog tona. Razmak između dviju susjednih frekvencijskih komponenata određen je modulacijskom frekvencijom

a na višima ako se frekvencija mijenja za $\pm$ 50 Hz. Pri tome modulacijska frekvencija treba da je između $4/T$ do $10/T$, gdje je T vrijeme odjeka, kako ga je definirao Sabine. Na svakoj mjernoj frekvenciji snima se barem pet karakteristika. Obično se uzima da je vrijeme odjeka određeno početnim nagibom karakteristike između — 5 i — 35 dB. Prosječan nagib na ovom području u svih pet karakteristika daje vrijeme odjeka na toj frekvenciji. Mjerne frekvencije odabiru se tako da su međusobno razmaknute za trećinu oktave. U normalnom slučaju to daje dovoljan broj točaka da se može nacrtati frekvencijska karakteristika vremena odjeka.

Vrlo uspješan izvor zvuka je *pištolj sa slijepim mecima*. Prasak eksplozije kontinuiran je spektar dosta ujednačena intenziteta na svim frekvencijama akustičkog područja, što se vidi i iz dijagrama na sl. 1.19. Mjeri se tako da se logaritamskom pisaču privede samo uzak pojas iz spektra praska, isfiltriran filtrom koji propušta trećinu oktave. Mjerni pojasovi frekvencija razmaknuti su za trećinu oktave.

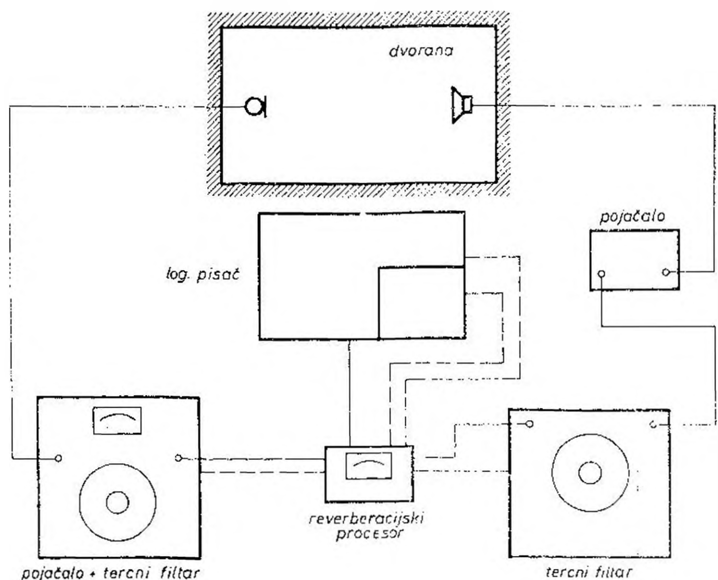
Kao signal za mjerenje karakteristike odjeka upotrebljava se i *bijeli šum*. Iza elektroničkog generatora takva signala ukapčaju se tercni filtri, nakon kojih se dobiveni uski pojasovi frekvencija privode pojačalu i zvučniku.

Prisutnost publike može mnogo promijeniti vrijeme odjeka, odnosno njegovu frekvencijsku karakteristiku. Zbog toga je bilo potrebno pronaći način koji će omogućiti mjerenje i u takvim okolnostima. To se može provesti u toku izvedbe glazbenih kompozicija. Pri tome treba odabrati skladbe u kojima dolazi do naglog prekida poslije glasnog sviranja. Za to je prikladan konac 3. stavka šeste simfonije Čajkovskoga (sl. 4.91). Postupak prilikom mjerenja jednak je onome s pucnjevima. Tu valja napomenuti da neki muzički instrumenti malog unutrašnjeg prigušenja, kao što je bubanj, emitiraju zvuk i pošto se prestane svirati, što može unijeti pogrešku u rezultate.



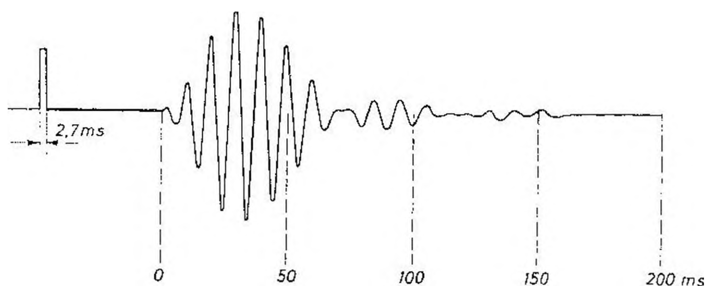
Sl. 4.91. Krivulja odjeka dobivena zvukom orkestra

Mjerenje vremena odjeka pomoću opisanih signala — frekvencijski moduliranim tonom, praskom pištolja ili bijelim šumom — ima nedostatak u tome što ne daje potpuno ponovljiv oblik karakteristika odjeka. To se uklanja *Schroeder-Kuttruffovom metodom*, za koju je tvrtka *Bruel* & *Kjaer* konstruirala poseban dodatni uređaj nazvan *reverberacijski procesor*. Tim se aparatom proizvede vrlo kratak pravokutni električki impuls koji se preko tercnog filtra i pojačala privede zvučniku (sl. 4.92). Sl. 4.93. sadrži dijagram pravokutnog impulsa i napona na izlazu tercnog filtra. Zvučni signal primljen mikrofonom ulazi u frekvencijski



Sl. 4.92. Shema spajanja aparature za mjerenje vremena odjeka prema Schroederovoj i Kuttruffovoj metodi

Sl. 4.94. Krivulje odjeka: a) snimljene na uobičajen način i b) snimljene Schroeder-Kuttruffovom metodom



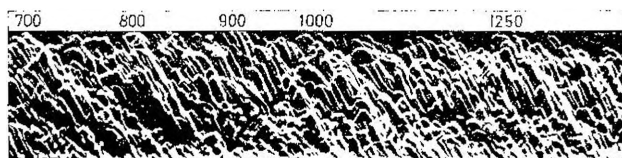
Sl. 4.93. Pravokutni impuls lijevo i odziv tercnog filtra na taj impuls. Središnja tercna frekvencija je 100 Hz (Brüel & Kjaer).

a)
5 dB
b)
5 dB

spektrometar, gdje se pojačava i tercno filtrira. Na daljem svom putu signal se vraća u reverberacijski procesor da bi se u njemu kvadrirao i integrirao. Tako obrađeni signal privodi se logaritamskom pisaču. Dobivena karakteristika odjeka nema sitnih nazubljenja koja su prisutna prilikom mjerenja drugim metodama; ona je praktički eksponencijalna i potpuno je ponovljiva. (sl. 4.94).

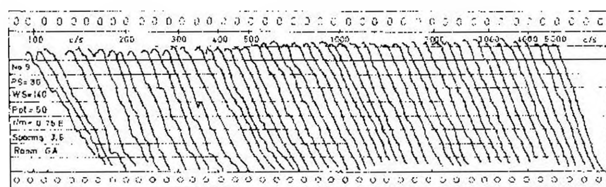
4.8.2. Snimanje karakteristike odjeka uz kontinuirano promjenljivu frekvenciju

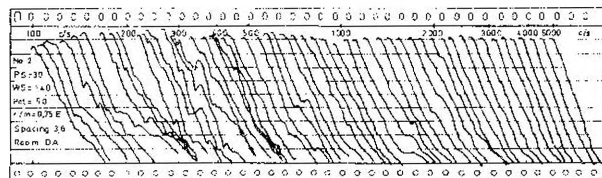
Metoda snimanja vremena odjeka na stanovitome manjem broju frekvencija akustičkog područja nije sasvim prihvatljiva stoga što je nemoguće doznati kakav je oblik karakteristike odjeka na ostalim frekvencijama. Stručnjaci *Britanske radio-difuzne službe (BBC)* razvili su metodu kojom se može snimiti slika odjeka na cijelome akustičkom spektru. Pri tome se kroz zvučnik šalju u prostoriju kratki tonski impulsi. Signali koje primi mikrofon pojačavaju se u logaritamskom pojačalu, ispravljaju i privode katodnoj cijevi. Na ekranu katodne cijevi oni se, dalje, pretvaraju u krivulje odjeka koje snima foto-kamera. Budući da se frekvencija tongeneratora kontinuirano mijenja u cijelome akustičkom području, dobivaju se krivulje odjeka na nekoliko stotina međusobno vrlo blizih frekvencija. Slika odjeka, kakvu vidimo na sl. 4.95, potanko predočuje akustičke prilike u prostoriji. Interpretiranje takvih slika zahtijeva veliko iskustvo, a opet ostaje sumnja jesu li zaključci posve ispravni.

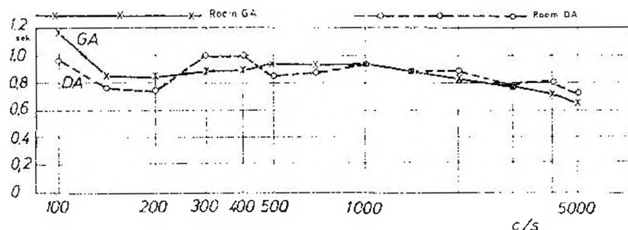


Sl. 4.95. Krivulje odjeka uz kontinuirano promjenljivu frekvenciju snimljene prema Sommervilleovoj metodi

Brüel je ovu metodu usavršio utoliko što je umjesto impulsa čistog tona upotrebio impulse frekvencijski moduliranog tona, i što je izjednačio početne razine karakteristika. Karakteristike je umjesto pomoću oscilografa i kamere upisivao svojim logaritamskim pisačem. Rezultat je takva snimanja na sl. 4.96, zajedno s odgovarajućim frekvencijskim karakteristikama vremena odjeka.



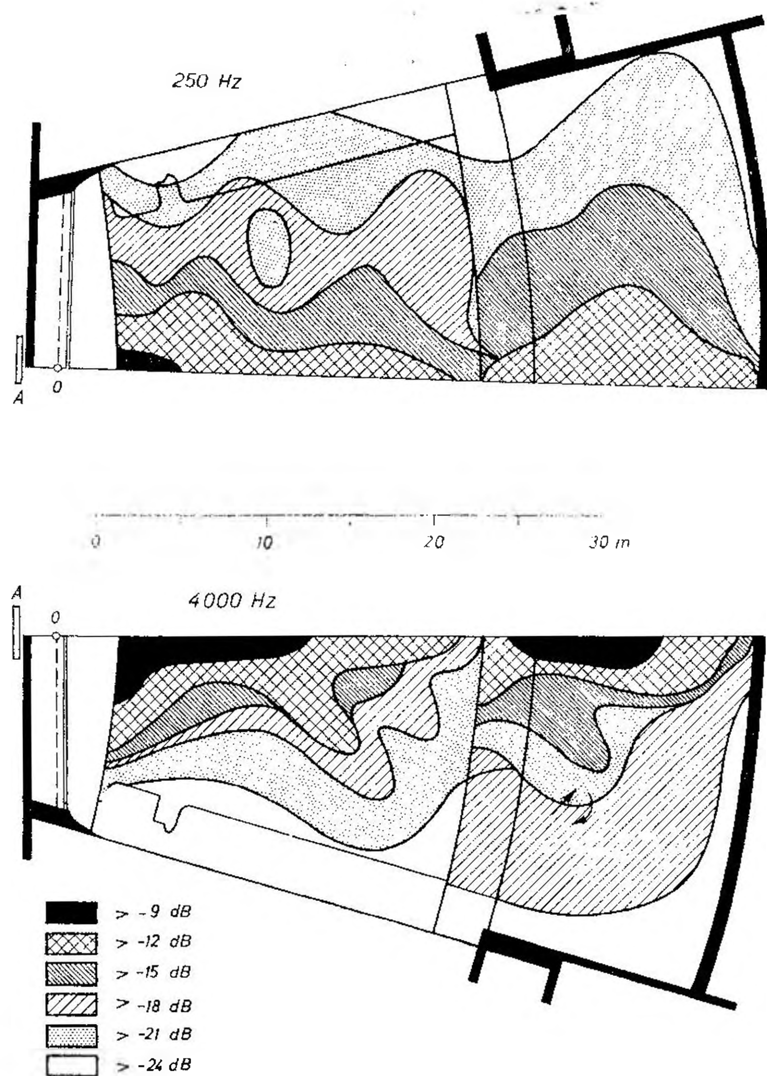




Sl. 4.96. Krivulje odjeka uz kontinuiranu promjenljivu frekvenciju snimljene prema Brüelovoj metodi. Na donjoj su slici frekvencijske karakteristike vremena odjeka dobivene iz gornjih krivulja.

4.8.3. Mjerenje raspodjele zvučne energije

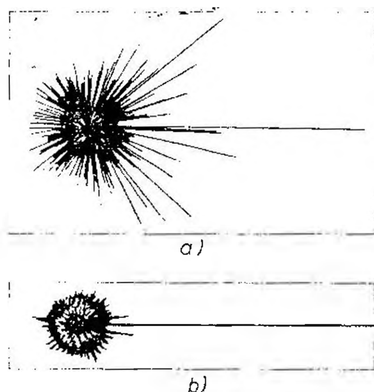
Kako se zvučna energija raspoređuje po površini auditorija, može se ustanoviti mjereći zvučni tlak na raznim mjestima u dvorani. Velike razlike u razinama tlaka upućuju na to da dvorana akustički ne zadovoljava. Takav je primjer na sl. 4.97. Kako je dvorana simetrična, dovoljno je da se raspodjela razina zvučnog tlaka prikaže na polovici njezina tlocrta.



Sl. 4.97. Raspodjela zvučnog tlaka u jednom auditoriju na frekvenciji od 250 Hz (gore) i 4000 Hz (dolje)

4.8.4. Mjerenje usmjerne raspodjele zvučnih refleksija ili usmjerne difuznosti

Pri ovom postupku izvor zvuka emitira zvuk podjednako u svim smjerovima. Pomoću vrlo usmjerenog mikrofona, kao što je mikrofon s paraboličnim reflektorom, hvata se zvuk iz različitih smjerova. Rezultat mjerenja može se slikovito



Sl. 4.98. Model koji prikazuje raspodjelu zvučnog tlaka u raznim smjerovima neke dvorane: a) primjer dobre usmjerne difuznosti zvuka i b) primjer loše usmjerne difuznosti

prikazati kuglom s „bodljama", gdje duljina „bodlje" takva „ježa" predočuje intenzitet (u logaritamskom mjerilu) reflektiranog zvuka iz određenog smjera. „Jež" s više-manje ujednačenim „bodljama" (kao na sl. 4.98.*a*) prikazuje dobru usmjernu difuznost, a onaj na sl. 4.98.*b*, gdje su „bodlje" vrlo različite duljine, daje sliku loše usmjerne difuznosti.



Sl. 4.99. Oscilogrami direktnih tonskih impulsa i popratnih refleksija. Na prvoj je slici oscilogram pravokutnoga tonfrekvencijskog impulsa (ovojnice) trajanja od 10 ms koji je priveden ulazu pojačala. Na drugoj je slici oscilogram tog impulsa snimljen ispred zvučnika. Treća slika prikazuje isti tonski impuls na mjestu u dvorani gdje je slušanje dobro, a četvrta slika na mjestu na kojem je slušanje loše.

4.8.5. Oscilografiranje direktnog i reflektiranog zvuka

Ovaj način ispitivanja akustičkih osobina neke prostorije izvodi se tako da se zvučnikom emitiraju kratki tonski impulsi pravokutna oblika i da se oscilografu preko mikrofona i pojačala dovede direktni i reflektirani zvuk. Fotografski snimci slike na ekranu oscilograma pokazuju kakav je odnos izravnog zvuka prema reflektiranome na pojedinim mjestima u dvorani. Sl. 4.99. sadrži oscilogram impulsa na mjestu gdje je slušanje dobro a i gdje ono ne zadovoljava.

Za izvor zvuka upotrebljava se također električko iskrište, gdje se izbijanjem kondenzatora proizvede vrlo kratka električka iskra i time vrlo kratak akustički prasak. Tad oscilogrami imaju oblik kao na sl. 4.100.



Sl. 4.100. Reflektirani zvučni impulsi u koncertnoj dvorani Royal Festival Hall u Londonu. Gornja dva reda snimljena su u sredini dvorane, a donja dva na njezinoj desnoj strani.

4.7.6. Ispitni koncerti

Još uvijek nema mogućnosti da se unaprijed, prije gradnje, u potpunosti predvide akustičke osobine neke dvorane. Ni mjereći njezina svojstva kad je već sagrađena nije moguće dobiti rezultate iz kojih bi se moglo zaključiti hoće li ta dvorana akustički potpuno zadovoljavati ili ne. Konačan sud o kvaliteti neke koncertne dvorane donosi *grupa stručnjaka eksperata, koji slušajući izvedbe u punoj dvorani ocjenjuju pojedine finese glazbenog zvuka na pojedinim mjestima u dvorani*. Vrijednost novih mjernih metoda ogleda se u tome koliko se dobiveni rezultati slažu s mišljenjem eksperata. Možemo, dakle, reći da je stupanj akustičke kvalitete stvar subjektivne ocjene, potkrijepljene rezultatima mjerenja.

Auditivno ispitivanje treba provesti *u punoj dvorani* zato da bi se eventualni akustički nedostaci otkrili pri „pogonskim" uvjetima. Uz veću, naime, apsorpciju, dakle uz manje vrijeme odjeka, može doći do izražaja jeka koje nema kad je dvorana prazna. A i obratno: štetne rezonancije između paralelnih stijena mogu nestati kad dvoranu ispuni publika.

Pri ocjeni kvalitete tona s glazbenog stajališta valja iznijeti mišljenje o tome kakva je u dvorani: 1. *definiranost* ili *jasnoća tona*, 2. *punoća tona*, 3. *uravnoteženost* i 4. *usklađenost*. Pod definiranošću tona razumijeva se mogućnost da se razlikuje svaki pojedini instrument u orkestru. Zatim, da se u brzom slijedu nota svaka od njih može dobro čuti. O punoći tona govorimo npr. onda kad ističemo razliku između izvedbe na otvorenome i izvedbe u dvorani. Muzičari bi rekli da izvedba u dvorani zvuči živo, bogato, da se u dvorani dobiva sonornost ili rezonancija. Uravnoteženost se postiže kad između pojedinih dijelova orkestra vlada za slušaoce u dvorani ispravan odnos glasnoće. Usklađenost je pojam pod kojim se razumijeva mogućnost da se orkestar čuje kao homogen izvor, a ne kao skup individualnih izvora.

4.9. METODE AKUSTIČKOG PROJEKTIRANJA

Kad se akustički projektira velika dvorana, potrebno se držati nekog redoslijeda i pravila. Ovdje ćemo prikazati postupak što ga predlaže *J. Moir* u knjizi *High quality sound reproduction:*

1. Prema arhitektovu pretprojektu i podacima o namještaju izračuna se vrijeme odjeka na, recimo, šest frekvencija između 80 i 4 000 Hz.
2. S obzirom na svrhu dvorane prilagodi se vrijeme odjeka na optimum, kako po apsolutnoj vrijednosti tako i po frekvencijskoj karakteristici. Gdje je auditorij promjenljiv faktor, treba vrijeme odjeka prilagoditi na optimum za dvije trećine prisutnih slušalaca. Ako je u vezi s prilagođivanjem vremena odjeka potrebno dodavati akustičke materijale, oni se ne stavljaju na strop. Većina apsorpcijskih materijala, sjedala, sagovi te slušaoci, koncentrirani su na podu, pa je tok zvučne energije između stropa i poda dovoljno prigušen i bez akustičke obrade stropa. Tok energije u vodoravnom smjeru između zidova samo je neznatno oslabljen. Ako je zbog korekcije vremena odjeka potrebno dodati apsorbere, oni se stavljaju na zidove, osobito na onaj nasuprot izvoru zvuka. Pri tome se apsorberi ne smiju koncentrirati na velike površine, već se na zidove nepravilno raspodjeljuju, i to tako da pojedina površina ne premaši 5% ukupne.
3. Izbjegavaju se konkavne površine. Tom zahtjevu dan je pravi stupanj važnosti ako se ponovi šest puta.
4. Izbjegavaju se velike ravne plohe, naročito ako će se instalirati razglasni uređaji. Velike plohe valja razbiti u nepravilne likove. Pri tome se mora znati da su izbočenja u službi difuzora uspješna samo onda ako su im dimenzije približno jednake ili su veće od valne duljine. Na sreću, važnost difuznosti opada ispod 500 ili 600 Hz ($\lambda \approx 60$ cm). Da se stvori difuznost, najefikasniji su pravokutni stupovi i „koferi".
5. Lagana neparalelnost zidova poželjna je, osobito ako će se ugraditi razglasni uređaj. Zvučnici se ne mogu tako konstruirati da daju paralelan snop zvučnih zraka.
6. Oblikom zidova valja smanjiti mogućnost koncentrirane refleksije zvučne energije na površini sjedala sa zakašnjenjem većim od 50 ms.
7. Izbjegavaju se nagle promjene presjeka dvorane. Luk iznad proscenija, koji je možda potreban u kazalištima, prenesen je i u kinematografe, gdje je nepotreban. U oba ta primjera suženje prostora na mjestu proscenija loša je praksa.
8. Troškovi za građenje i površina koju treba akustički obraditi smanjuju se ako se volumen dvorane strogo nadzire. Za kina i kazališta potrebno je odrediti 4—5 m^3 po sjedalu, a za koncertne dvorane oko 7 m^3 jer je tu vrijeme odjeka dulje, što zahtijeva „živa muzika".
9. Valja se nadati najboljem!

Akustičko projektiranje velike dvorane vrlo je kompleksan problem jer treba omogućiti dobro slušanje na svim sjedalima. Ne smije se zaboraviti da i *muzičarima valja osigurati dobro slušanje;* pojedini izvođači mogu svirati u savršenom sinkronizmu samo onda ako jedan drugoga dobro čuje. Da se izbjegnu grube pogreške i

kasniji skupi popravci, primjenjuju se već prilikom projektiranja razne metode koje omogućavaju da se unaprijed zna kakva će biti raspodjela zvuka po prostoriji, odnosno kakve će osnovne akustičke osobine imati dvorana.

U svojoj knjizi „Music, Acoustics & Architecture" autor *Leo L. Beranek* opisuje akustičke osobine pedeset i četiri najbolje svjetske koncertne dvorane i operne kuće. Gotovo u svim tim dvoranama autor je osobno prisustvovao muzičkim izvedbama i donosio svoj vlastiti sud o muzičkoj kvaliteti. Sakupio je arhitektonske nacrte i fotografije, intervjuirao dirigente, muzičare, muzičke kritičare i kompetentne slušatelje. Može se, dakle, reći da je u šest godina putovanja po svijetu sabrao golemu količinu podataka o svjetskim dostignućima na području akustike koncertnih dvorana i opernih kuća. Prema tome, sasvim je logično da je 1956. godine bio angažiran za akustičko projektiranje koncertne dvorane Philharmonic Hall u Lincolnovu centru u New Yorku. U petnaestom poglavlju svoje knjige autor navodi da su zajedno s njim kao savjetnici arhitektu M. Abramovitzu bili imenovani još i akustičari Bolt i Newman iz Amerike i Hope, Bagenal i Leaside iz Engleske. Nadalje autor iznosi da su se predstavnici centra u čijem se sklopu nalazi koncertna dvorana (Lincoln Center), arhitekt i akustičari složili u tri točke:

Prvo, dvorana Philharmonic Hall treba prvenstveno služiti za normalni repertoar Njujorškog filharmonijskog orkestra, Bostonskog simfonijskog orkestra i Filadelfijskog orkestra. Dvorana, dakle, nije predviđena za višenamjensku upotrebu.

Drugo, broj sjedala ne smije biti veći nego što to zahtijeva dobra akustika.

Treće, neće se štedjeti napora ni sredstava da Philharmonic Hall zauzme svoje mjesto među najboljim dvoranama na svijetu kao što su one u Bostonu, Beču, Amsterdamu i Baselu.

Pri određivanju volumena dvorane odabran je nešto veći volumen nego što ga imaju najbolje dvorane svijeta kod kojih je srednja vrijednost oko 17000 m^3. Smatralo se da grad kao što je New York treba imati koncertnu dvoranu za smještaj više slušatelja. Tako se došlo do volumena od 24000 m^3 jer se smatralo da se primjenom novih principa i tehničkih sredstava može postići isti muzički ugođaj kao u manjoj dvorani. Za srednje vrijeme odjeka preporučena je vrijednost između 1,85 s i 1,95 s, s time da na basovima ono bude barem 1,2 puta veće. Radi dovoljnog komfora i sigurnosti nije se išlo na 3000 sjedala, koliko bi se moglo smjestiti, već na 2644 mjesta.

Posebna pažnja posvećena je akustičkoj fleksibilnosti. Vodeći računa o tome da će se vjerojatno muzički ukus vremenom mijenjati, predviđene su mogućnosti da se vrijeme odjeka skrati ili produlji. U vezi s time autor u knjizi kaže: „Philharmonic Hall je vjerojatno prva dvorana projektirana kao 'living hall' — dvorana kojoj se akustika može mijenjati prema promjeni ukusa, i to bez velikih i vidljivih promjena na unutrašnjem izgledu."

U spomenutom poglavlju Beranek opširno opisuje kako je izvedeno ugađanje dvorane za vrijeme od tjedan dana koliko je za to bilo predviđeno. Muzički repertoar su izvodile instrumentalne i vokalne grupe, a također i solisti. Na devet muzičkih pokusa bilo je zastupano trideset različitih kompozitora. Poseban problem bila je publika. Rješenje je postignuto „sintetičkim auditorijem" — apsorpcijskim prekrivačima od staklene vune prebačenima preko naslona svakog sjedala. Takav je prekrivač, veličine 100 × 75 × 2,5 cm, imao na frekvencijama iznad 400 Hz apsorpciju približno jednaku onoj što je ima jedna osoba. Autor ističe da je prednost takvog „sintetičkog auditorija" u njegovoj konstantnoj apsorpciji za vrijeme cijelog tjedna koliko je trajalo ugađanje dvorane.

Akustička mjerenja provedena su praskom pištolja, kontinuiranim ili impulsnim „bijelim šumom", frekvencijski moduliranim tonom, sinusoidnim zvučnim impulsima, kao i zvukom orkestra. Mjereno je zakašnjenje reflektiranog prema direktnom zvuku i omjer intenziteta direktnog i odječnog zvuka.

Za akustičko testiranje naručena je i specijalna muzička kompozicija s trajanjem od četiri minute koja se upotrebljavala za testiranje pune i prazne dvorane.

Nakon svake akustičke promjene dvije su kompozicije kao standardne snimane na različitim mjestima dvorane s dva dvokanalna magnetofona koji su ulazne signale dobivali iz dviju binauralnih fantomskih glava. Preslušavanjem snimki mogao se uspoređivati akustički efekt u pojedinoj fazi eksperimenta.

O kvaliteti akustičkog efekta svake faze ugađanja donosilo je svoj sud četrnaest eksperata, muzičara i akustičara. Povremeno taj se broj povećavao i na dvadesetak. Tri puta za vrijeme tjedna ugađanja članovi orkestra su pismeno iznosili svoja zapažanja koja su se proučavala da se utvrdi kako pojedini dijelovi orkestra čuju sebe ili druge dijelove orkestra.

Poglavlje o projektiranju i ugađanju dvorane završava se ovim riječima: „Tako se je u subotu, 2. lipnja 1962, završilo jedinstveno poglavlje u analima akustičkog projektiranja — pet godina suosjećajne suradnje između umjetnika i znanstvenika. Hoće li povijest uvrstiti Philharmonic Hall među najbolje prostorije za koncertnu glazbu, još je uvijek suviše rano da to prosudimo.

Ali, razumijevanje koje je već postignuto između muzičara, arhitekata i akustičara unaprijedit će akustičko projektiranje u budućnosti i omogućiti da se izbjegnu mnoge zablude iz prošlosti."

Međutim, kako u svom članku „Acoustical Measurements in Philharmonic Hall (New York)" objavljenom u časopisu Journal of Acoustical Society of America (Volume 40, Number 2, 1966) izvještavaju autori *M. R. Schroeder*, *B. S. Atal*, *G. M. Sessler* i *J. E. West*, već početkom 1963. godine uprava Lincolnova centra pozvala je Bellove laboratorije (Bell Telephone Laboratories), odjel za akustička istraživanja, da prisustvuju objektivnoj ocjeni akustike u dvorani Philharmonic Hall. Predviđeno je da mjerenja budu provedena primjenom digitalnog računara i uređaja za proizvođenje mjernog impulsa posebna oblika.

Autori spomenutog članka navode da se većina slušatelja, ocjenjujući kvalitetu dvorane Philharmonic Hall, složila u slijedećem: 1) dvorana ima lošu karakteristiku na niskim frekvencijama što utječe na čujnost čela i kontrabasova, 2) nedostaje subjektivni osjećaj odjeka, 3) zamjećuje se jeka koja se pojavljuje zbog refleksija od stražnje stijene, 4) nema dovoljno zvučne difuznosti, i 5) loši su akustički uvjeti za muzičare na podiju.

Komitet akustičkih savjetnika kojemu je na čelu bio *V. O. Knudsen*, a članovi *H. Keilholz*, *P. S. Veneklasen* i *M. R. Schroeder*, predložio je da se izvedu ove preinake: 1. da se promijeni poredaj ovješenih akustičkih reflektora, 2. da se promijeni oblik jednog dijela bočnih stijena, 3. da se na podiju postavi akustička školjka, 4. da se dio podija stepeničasto izdigne, 5. da se presvuku čeone plohe balkona, 6. da se poveća apsorpcija stražnjih stijena, i 7. da se na bočne zidove postave difuzori.

Predložene promjene izvedene su u četiri faze: prva faza u srpnju 1963, druga u kolovozu iste godine, treća u rujnu 1964, i četvrta u kolovozu 1965. Mjerenja su pokazala da subjektivni osjećaj vremena odjeka ovisi o nagibu početnog dijela karakteristike odjeka do — 15 dB. To vrijeme subjektivno je bilo ekvivalentno eksponencijalnom odječnom procesu koji je simuliran na kompjutoru. Za subjektivni osjećaj „suhoće" zvuka u dvorani krivnju je, dakle, snosila malena vrijednost početnog vremena odjeka.

Konstatirano je da su tonovi niskih frekvencija to slabiji što je udaljenost od podija veća. Nađeno je da je tome uzrok vertikalna „rezonancija" u prostorima između redova sjedala što je dovodilo do selektivnog slabljenja na frekvencijama oko 200 Hz. Efekt difrakcije oko gornjih dijelova sjedala uzrokovao je širokopojasno slabljenje u području od 100 do 400 Hz. Autori smatraju da se taj „efekt sjedala" vjerojatno pojavljuje u svim auditorijima u kojima sjedala za orkestar nisu postavljena stepeničasto.

Pokusi izvedeni na modelu koji je simulirao ovješene reflektore ukazali su na to da takvi reflektori u dvorani nisu efikasni na frekvencijama ispod 300 Hz. Poboljšanje je postignuto time što je smanjen razmak između pojedinih reflektorskih ploča i podignut dio ovješenog stropa.

Ranom energijom naziva se ona energija izravnog zvuka koja do slušalaca stigne unutar prvih 50 ms. Spomenutom promjenom rasporeda ovješenih reflektora i dodavanjem školjke na podiju postignuta je spektralna ravnoteža rane energije, što znači da je rana energija u području ispod 1000 Hz postala konstantna, basovski instrumenti postali su čujniji.

Već spomenutim, kao i daljim zahvatima, poboljšan je omjer između rane i odječne energije (one nakon 50 ms), a isto tako i faktor usmjerne raspodjele rane energije.

Refleksije od stražnje stijene stižu do prednjeg dijela dvorane sa zakašnjenjem od 200 do 300 ms. Mjerenja provedena tonskim impulsima s trajanjem od 3 ms pokazala su da se zvučni tlak tih refleksija nakon oblaganja stražnje stijene smanjio za 7 dB.

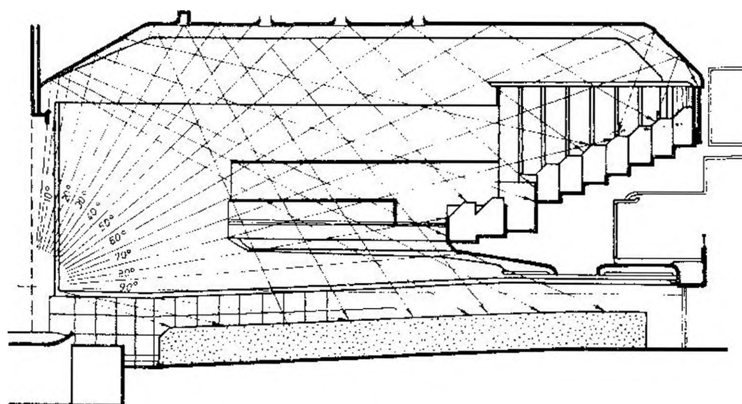
U zaključku članka autori dodaju da je u dvorani Philharmonic Hall, kao i u mnogim drugim koncertnim dvoranama, subjektivna akustička kvaliteta na balkonima viša nego u parketu. Stoga zaključuju da je usmjerna raspodjela ranih refleksija onaj faktor o kojemu ta kvaliteta najviše ovisi.

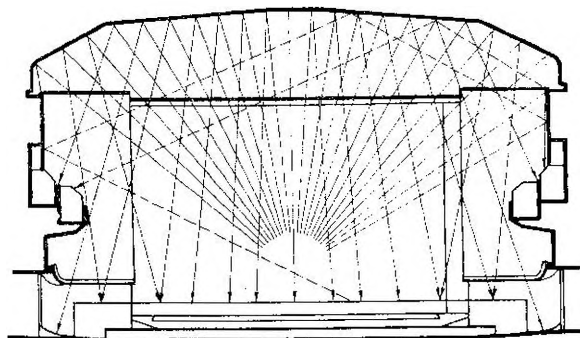
„Slučaj" s dvoranom Philharmonic Hall u New Yorku drastičan je primjer koji pokazuje da je J. Moir s pravom naveo u točki 9. svojih preporuka: „Valja se nadati najboljem!" Ipak, primjenom modernih metoda i mjernih uređaja danas su uvelike sužene mogućnosti za ozbiljnije promašaje.

4.9.1. Metoda crtanja zraka i čela zvučnih valova

Grafički ispitujući akustičke osobine prostorije mogu se ponekad na neka pitanja dobiti zadovoljavajući odgovori. Sl. 4.101. prikazuje primjer grafičkog ispitivanja crtanjem zvučnih zraka. Kao što se vidi, presjecima dvorane dan je

takav oblik da su završeci zvučnih zraka, koje u lepezi dolaze s pozornice, više-manje jednoliko raspoređeni u auditoriju. Iz toga se može zaključiti da će i zvuk biti približno iste glasnoće na svim mjestima.



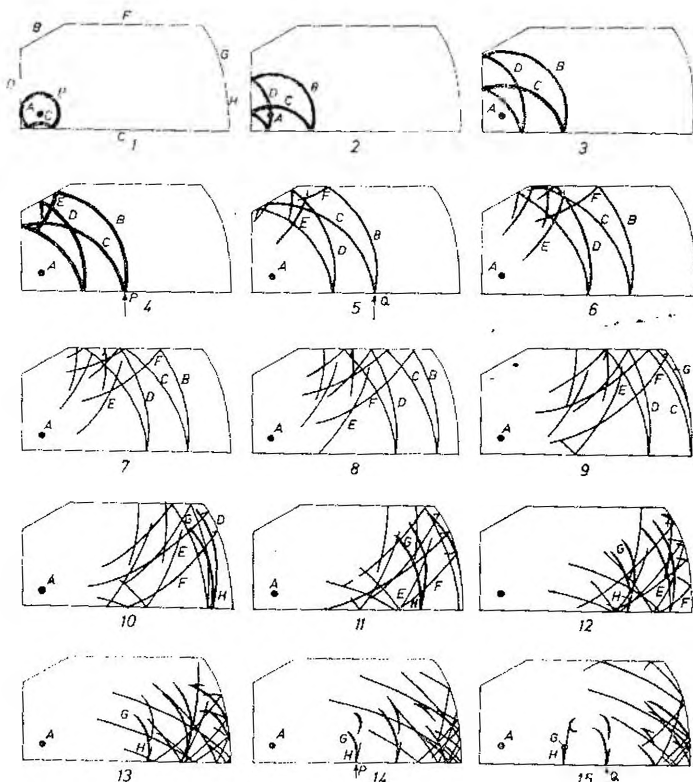


Sl. 4.101. Istraživanje osnovnih akustičkih osobina dvorane crtanjem zvučnih zraka u uzdužnom i poprečnom presjeku (prema Vermeulenu)

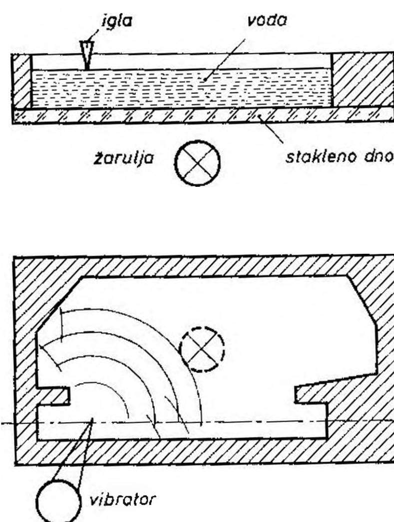
Sl. 4.102. predočuje grafičko ispitivanje u kojemu se crta čelo zvučnih valova u različito vrijeme. Tu je zamišljeno da zidovi savršeno odbijaju zvučne valove. Debljinom crte naznačena je jakost vala. Cijeli zvučni proces obuhvaćen tim crtežima odvija se samo u 1/15 s, dakle za vrijeme dok je reflektirani zvuk koristan zvuk. Na posljednjim se slikama vidi da val reflektiran od stražnjeg zida dolazi na mjesta označena strelicama *P* i *Q* nakon 1/15 s. Poslije tog vremena taj val postaje štetan. Još je štetniji val *G*, koji se reflektira od konkavnoga stražnjeg zida i koncentrira u fokusu *G*. On stiže 0,08 s nakon direktnog vala, a budući da je jako pojačan, čuje se kao jeka.

4.9.2. Metoda valova na vodi

Jedna od najstarijih metoda kojima se istražuje širenje zvučnih valova u nekom auditoriju je ona što se temelji na modelu s valovima na vodi. Uzima se plitka posuda u obliku presjeka dvorane (sl. 103). Dno posude je od stakla i kroz njega prodire



Sl. 4.102. Grafičko istraživanje prvih refleksija zvuka u dvorani crtanjem čela valova (prema Vermeulenu)



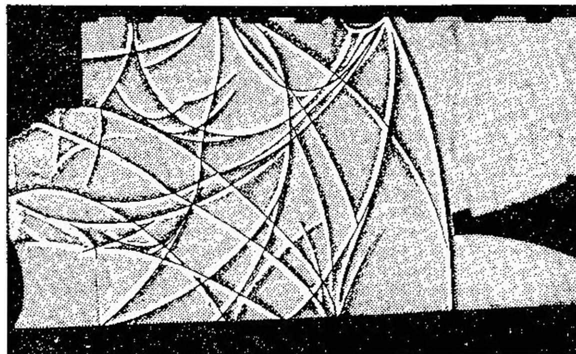
Sl. 4.103. Presjek uređaja za ispitivanje metodom valova na vodi i pogled na njega odozgo

svjetlost žarulje. Vode se nalije do dubine od nekoliko centimetara. Pomoću šiljka koji vibrira tjeran elektromagnetom proizvode se valovi. Njihovo širenje može se slijediti vizualno ili fotografski. Nedostatak je ove metode u tome što se poslije prve refleksije *valovi brzo priguše i* što je model *samo dvodimenzionalan.*

4.9.3. Metoda s električkom iskrom

Rezultat sličan onome s valovima na vodi dobiva se pomoću električke iskre. U dvodimenzionalnom modelu dvorane praskom se električke iskre proizvede zvučni val. Budući da na čelu vala zbog veće gustoće zraka nastaje lom svjetlosti, fotografski je moguće uhvatiti oblik vala u pojedinim trenucima (sl. 4.104). Ova je metoda komplicirana i s istim nedostacima kao i ona s valovima na vodi, tj. model je *dvodimenzionalan.*

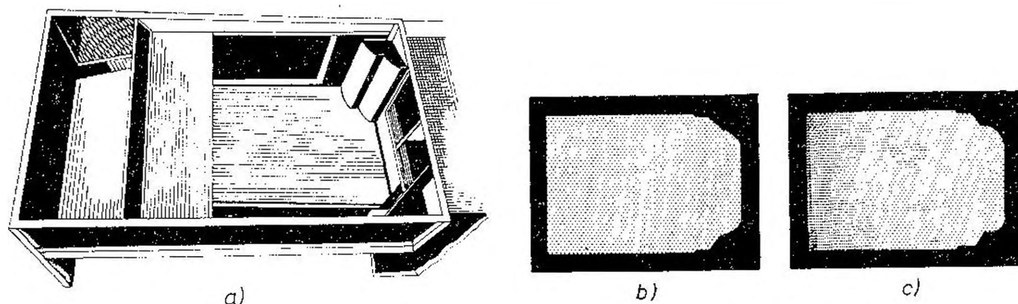
Zanimljivo je istaknuti kako se W. C. Sabine, kao jedan od prvih, služio metodom s električkom iskrom da bi fotografirao zvučne valove u modelu prostorije. Napomenimo, također, da je on u svom članku *Sense of Loudness* iznio rezultate svojih pionirskih izofonijskih mjerenja.



Sl. 4.104. Čela zvučnih valova u modelu dvorane. Prva električka iskra proizvede zvučni impuls, a druga, tempirana iskra potakne ekspoziciju fotografskog snimka

4.9.4. Optička metoda

Nepoželjne zvukovne koncentracije mogu se s većom sigurnošću otkriti samo pomoću *trodimenzionalnih modela.* Jedan od načina istraživanja pomoću takvih modela je onaj u kojemu se služimo svjetlošću. Model predočuje dvoranu obično smanjenu pedeset puta (sl. 4.105). Površine u dvorani koje jako reflektiraju zvuk, u modelu se izvedu od uglačana aluminijuma, a one što ga jako apsorbiraju (npr.



Sl. 4.105. Optičko ispitivanje u modelu. a) Model jednog kazališta. b) Jednoliko osvijetljeno opalno staklo koje predstavlja publiku naznačuje da će i zvučna energija u realnoj izvedbi biti jednoliko raspoređena. c) Nejednoliko osvjetljenje opalnog stakla, naročito ispod balkona, upućuje na akustički nedostatak (prema Vermeulenu i Boeru).

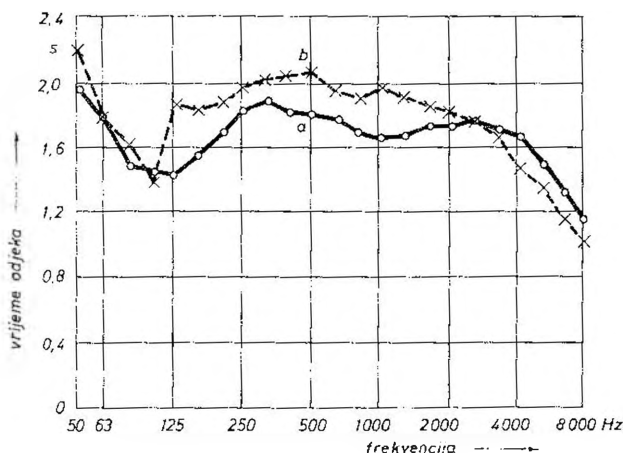
slušaoci) oboje se mat-crno. One površine koje u dvorani djeluju difuzno u modelu se oboje mat-bijelo. Svjetlosni izvor postavi se na mjesto gdje će u dvorani biti izvor zvuka. Intenzitet svjetlosti na pojedinim mjestima u modelu mjeri se foto-ćelijom. Na taj način moguće je otkriti slabo osvijetljena mjesta i ukloniti nedostatke.

4.8.5. Ultrazvučna metoda

Velik nedostatak svjetlosne metode je u tome što se ne mogu promatrati pojave difrakcije. Mnogo je bliža stvarnosti metoda modela s transponiranjem zvuka u ultrazvučno područje. Model se sagradi u omjeru 1 : 10 ili, što je još bolje, samo je mnogo skuplje, 1 : 5. U modelu se provodi akustičko ispitivanje, i to tako da se akustičke frekvencije multipliciraju s omjerom modela. Time se dobivaju valne duljine koje su prema dimenzijama modela u posve ispravnom odnosu. Frekvencija se povisuje pomoću magnetofona. Ako je npr. model s omjerom 1 : 10 onda se magnetofonski snimak snimljen na brzini od 20 cm/s reproducira u modelu brzinom od 2 m/s. Da bismo se što više približili stvarnom slušanju, primjenjuje se stereofonsko snimanje i reprodukcija.

Povećana apsorpcija zraka na ultrazvučnim frekvencijama smanjuje se njegovim sušenjem. Unutarnje plohe modela oblažu se materijalima kojima je koeficijent apsorpcije na ultrazvučnim frekvencijama približno jednak onome za normalne materijale na akustičkim frekvencijama. Publika se može nadomjestiti npr. lakiranom ljepenkom za pakovanje jaja, koja svojim izbočenjima predstavlja pojedinog slušaoca, a udubljenja odgovaraju međusobnom razmaku sjedala.

Snimajući ultrazvuk u modelu i reproducirajući ga normalnom brzinom mogu se akustičke osobine prostorije ocijeniti *slušanjem*, što je velika prednost pred svim ostalim metodama. Dijagram na sl. 4.106. prikazuje frekvencijske karakteristike vremena odjeka jednog radio-studija i njegova modela.



Sl. 4.106. Frekvencijska karakteristika vremena odjeka (a) dobivena je mjerenjem u studiju (Maida Vale 1 — BBC), a karakteristika (b) u modelu toga studija (1 : 8).

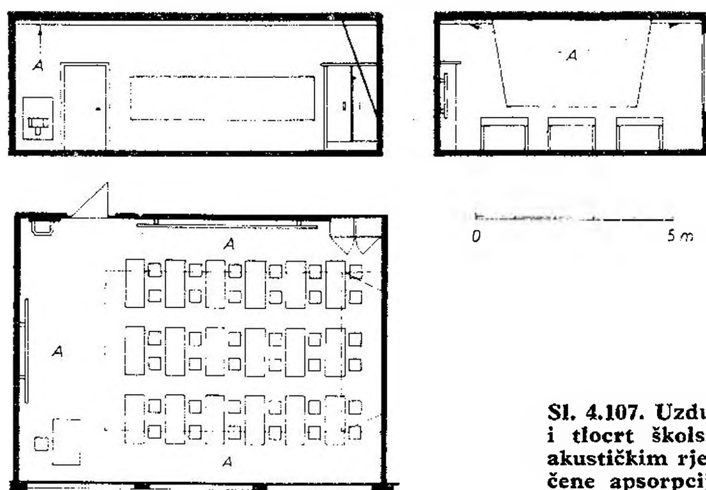
Kakve tehničke teškoće uzrokuje primjena ultrazvučne metode, može se vidjeti iz nekoliko podataka. U modelu 1 : 10 mikrofoni i zvučnici moraju prenositi područje od 400 Hz do 100 kHz. Za to mogu poslužiti elektrostatski zvučnici promjera od 25 mm. Da bi se simulirao orkestar i dobila dovoljno visoka zvučna razina, treba upotrijebiti gotovo stotinu takvih zvučnika. Mikrofoni su također elektrostatski

(kondenzatorski), promjera od oko 6 mm. Osjetljivost takvih mikrofona je mala, zbog čega je malen odnos signala prema šumu. To ograničuje mogućnost da se ocijeni kvaliteta prilikom slušanja. Dalje teškoće su u tome što se mora održavati relativna vlažnost od samo 3% u volumenu i do 100 m³.

4.10. PRIMJERI IZVEDENIH PROSTORIJA

4.10.1. Školska soba

Vrijeme odjeka u normalnoj praznoj školskoj sobi (na sl. 4.107. ona je dimenzija 9 × 6,5 × 3 m = 175 m³) iznosi oko 1,2—1,5 s, a uz prisutnost 20 osoba oko 0,9—1 s. Optimalno je vrijeme odjeka za takvu prostoriju oko 0,5 s. Da bi se vrijeme odjeka smanjilo na tu vrijednost, treba gotovo polovicu stropa prekriti akustik-pločama. Pri tome se njegov srednji dio ostavlja nepokrivenim da bi djelovao kao akustički reflektor. Na slici je još jedan reflektor, i to na stražnjoj strani. Ta nagnuta ploča, koja može biti od drveta ili sadre (gipsa), znatno poboljšava razumljivost govora na stražnjim sjedalima.

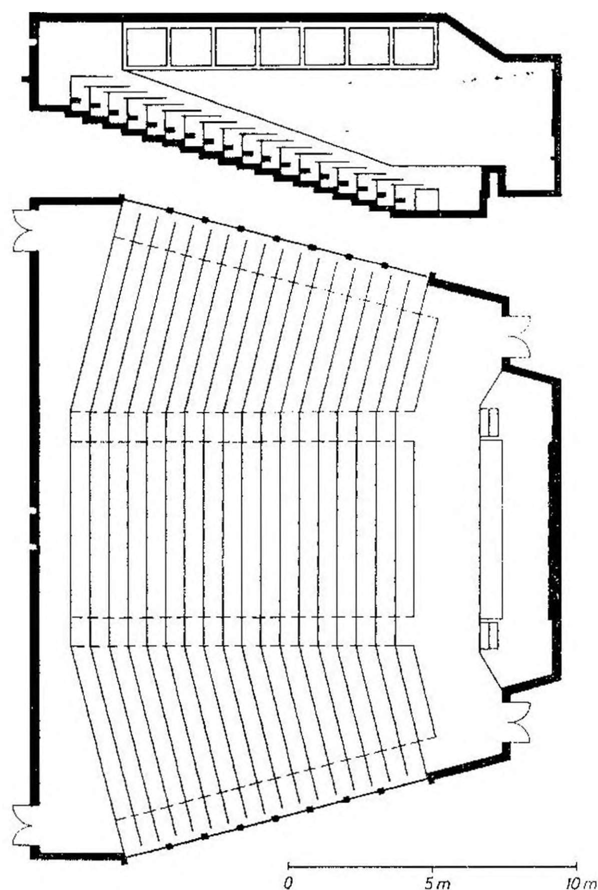


Sl. 4.107. Uzdužni i poprečni presjek i tlocrt školske sobe s modernim akustičkim rješenjem. Sa A su označene apsorpcijske ploče.

4.10.2. Predavaonica

U predavaonicama kojima je površina poda oko 100 m² akustičko projektiranje mnogo ovisi o načinu gradnje. Ako su zidovi lagani, prozori veliki i strop je lagan i ovješen, neće biti potrebno stavljati apsorpcijske materijale, ili će biti dovoljno da se oni postave samo na bočnim dijelovima stropa, odnosno na stražnjem zidu. Vrijeme odjeka takve prostorije kad je prazna iznosi oko 1—1,5 s, što sasvim zadovoljava. Uz masivnu gradnju, sa zidovima od opeke i betonskim stropom, vrijeme odjeka iznosi i do 4 s. Tad su prijeko potrebna apsorpcijska sredstva. I tu se preporučuje da se akustik-ploče upotrijebe kao u prethodnom primjeru, u školskoj sobi.

Te ploče ne valja postavljati nisko na zidove da ih publika ne bi oštećivala. Na sl. 4.108. vidimo projekt predavaonice za oko 500 slušalaca. Ako je ona akustički ispravno projektirana, nije potreban razglasni uređaj.

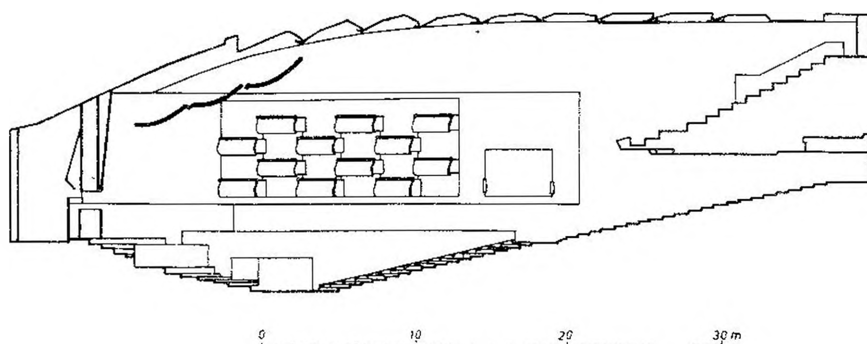


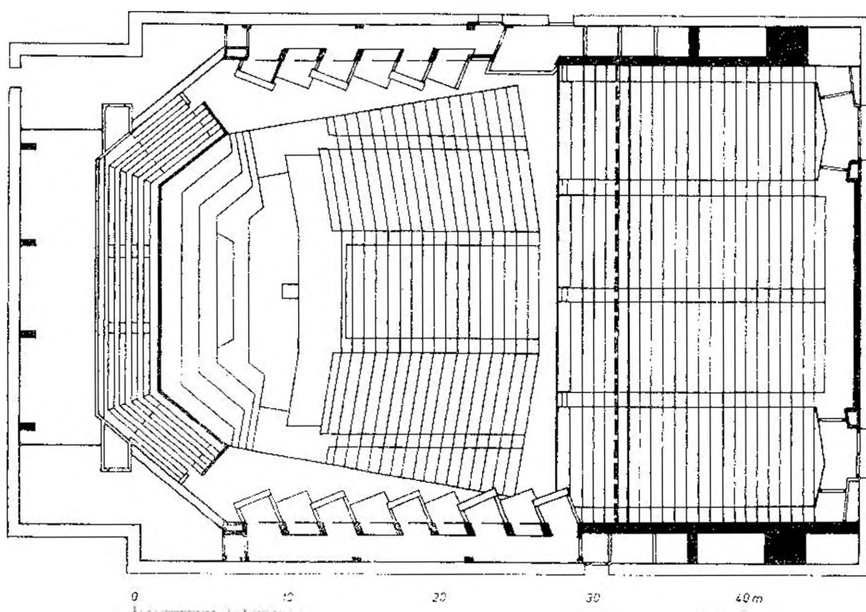
Sl. 4.108. Presjek i tlocrt predavaonica za 500 slušatelja

4.10.3. Koncertna dvorana

Kao primjer koncertne dvorane uzet ćemo londonski *Royal Festival Hall* (sagrađen 1951). Volumen te dvorane, koju u tlocrtu i presjeku vidimo na sl. 4.109, iznosi 22 000 m^3, a ima 3 000 sjedala. Budući da je sredina podija udaljena od stražnjih sjedala 45 m, bilo je potrebno iskoristiti sve mogućnosti da se osigura jednolika raspodjela zvuka. Tako su izdignuta sjedala, zatim je posebno oblikovan strop i

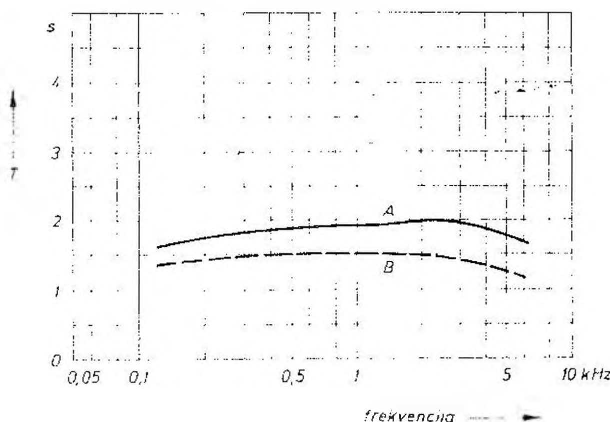
upotrijebljen je reflektor iznad podija. Strop je razdijeljen u elemente da se dobije što veća difuznost zvuka. Iz bočnih stijena strše balkoni, čime se također raspršuju zvučni valovi. Balkoni nisu jednoliko raspoređeni na obje strane. Reflektori su drveni, debljine 5 cm i (zajedno s rasvjetnom opremom) teški su 15 tona. Tako teški reflektori ugrađeni su zato da se dobije refleksija i u području niskih frekvencija. Između podija i prvog reda sjedala ostavljen je dosta velik prazan prostor. Pod toga dijela dvorane služi kao reflektor za zvuk instrumenata prvog reda izvođača.





Sl. 4.109. Presjek i tlocrt koncertne dvorane Royal Festival Hall u Londonu

Kao što se vidi na sl. 4.110, frekvencijska karakteristika odjeka gotovo je horizontalna. Možda bi se moglo prigovoriti što se ona na niskim frekvencijama čak nešto spušta umjesto da se izdiže. Ima primjedbi i da instrumentalni soli ne dolaze do punoga glazbenog izražaja, čemu je razlog vrlo velik volumen dvorane.



Sl. 4.110. Frekvencijske karakteristike vremena odjeka u koncertnoj dvorani Royal Festival Hall: A — dvorana bez publike i B — s publikom

Vrijedno je iznijeti što projektanti akustičari kažu o tome kako se dogodilo da je vrijeme odjeka dvorane suviše kratko, naročito na niskim frekvencijama. U svom članku „The Acoustics of the Royal Festival Hall, London" („Acustica", 1953, 3—1) autori *P. H. Parkin, W. A. Allen, H. J. Purkis* i *W. E. Scholes* pišu:

„Postojala je namjera da se na srednjim frekvencijama postigne što je moguće dulje vrijeme odjeka. U ranom stadiju projektiranja mislilo se da vrijeme odjeka treba da bude 2,2 s, vrijednost koju Bagenal i Wood preporučuju za dvoranu volumena kao što ga ima Royal Festival Hall. Kad je projektiranje uznapredovalo i kad su stajali na raspolaganju rezultati mjerenja u drugim britanskim koncertnim dvoranama došlo se do uvjerenja o nemogućnosti da se ta vrijednost postigne. Volumen po sjedalu bio bi pretjerano velik pa bi se pojavila jeka od udaljenih ploha. Izračunavanjem vremena odjeka u toku projektiranja dobila se vrijednost od 1,7 s na 500 Hz. Taj iznos nije bilo moguće povisiti jer se volumen po sjedalu nije mogao povećati (npr. podizanjem stropa) iz građevinskih razloga, niti se je mogao reducirati broj sjedala. Stoga se pazilo da apsorpcijske plohe budu što je moguće manje (izuzev male površine saga što je zahtijevao arhitekt), a da pri tome ipak ne bude jeke. Vrijednost od 1,7 s preporučuju Knudsen i Harris za dvoranu toga volumena. Budući da se nekoliko dobrih britanskih koncertnih dvorana nalazi blizu ili ispod Knudsenova i Harrisova optimuma smatralo se da je ta vrijednost prihvatljiva.

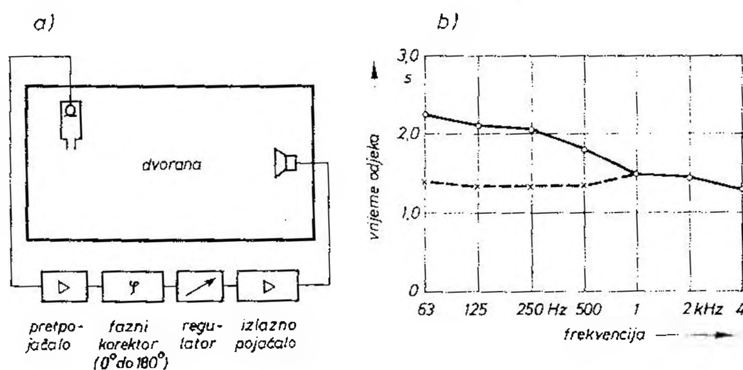
Na visokim frekvencijama vrijeme odjeka pretežno ovisi o apsorpciji zraka i auditorija na što projektant ne može utjecati. Međutim, na niskim frekvencijama postoji opasnost da vrijeme odjeka bude suviše dugo. U starijim građevinama može se naći mnogo niskofrekvencijskih apsorbera u obliku sadrenih ploča i sl. U modernim konstrukcijama od armirana betona i s malo ukrasa takve apsorpcije ne mora biti. Projektantima je stalno bila na umu mala koncertna dvorana od armirana betona, građena 1930, koja je na niskim frekvencijama imala vrijeme odjeka od 13 s, pa je pregrađena za uredske potrebe. Izračunavanje vremena odjeka na srednjim je frekvencijama nepouzdano. Na niskim je frekvencijama nepouzdanost još veća jer nema podataka o apsorpciji ploha u tom frekvencijskom području. Na primjer, koeficijent apsorpcije stropa debljine od 5 cm i sa zračnim prostorom od 4 m iznad njega može na frekvenciji od 125 Hz imati bilo koju vrijednost između 0,05 i 0,4. Najveća je, prema tome, opasnost bila da vrijeme odjeka na niskim frekvencijama bude predugo. Projektanti bi za vrijeme projektiranja bili zadovoljni ako bi vrijeme odjeka padalo u raspon između 1,7 do 2,5 s, to jest između 100% i 150% od vrijednosti na 500 Hz. Načinjena je oprezna procjena apsorpcije koja se na 125 Hz može očekivati od različitih ploha i publike. Da vrijeme odjeka ne bi bilo predugo u projektu je predviđena dosta velika površina s drve-

nim pločama udaljenima od zida. Kako se glavni dio apsorpcije mogao očekivati od tih ploča njihova je konstrukcija bila različita da se apsorpcija ne bi koncentrirala na uski pojas frekvencija."

Dalje u članku autori iznose ocjene muzičara i muzičkih kritičara o kvaliteti gotove dvorane. Napominju da broj sjedala nije bilo moguće smanjiti jer dvorana mora u eksploataciji biti ekonomična. U zaključku između ostaloga navode:

„Jedina od kritičkih primjedaba koja je zaista ozbiljna jest ona o nedostatku punoće zvuka. Autori i dalje smatraju da se taj nedostatak može otkloniti produljivanjem vremena odjeka. Vrijednost od 1,5 s na 500 Hz je 0,2 s ispod Knudsenova i Harrisova optimuma. Možda bi povećanje od 0,2 s bilo dovoljno, a veće povećanje još bolje. Gornja se granica može nazrijeti iz činjenice da je za vrijeme pokusa u periodu testiranja dvorane (uz vrijeme odjeka bez publike od oko 2,3 s) definiranost tona bila znatno lošija. U budućem projektiranju valjalo bi uložiti sve napore da vrijeme odjeka na srednjim frekvencijama bude što je moguće dulje. Ako bi se dogodilo da je suviše dugo, ono se može skratiti na jednostavan način, npr. stavljanjem sagova ili perforiranjem drvenih ploča. Proračun apsorpcije baziran na vremenu odjeka izmjerenom u završenoj punoj dvorani pokazuje da više od polovice ukupne apsorpcije na srednjim frekvencijama otpada na sjedala i auditorij, iz čega izlazi da je povećanje volumena najefikasniji način za produljivanje vremena odjeka. Stalno se je smatralo da je bitno osigurati se od suviše dugog odjeka na niskim frekvencijama, jer bi to bila veća pogreška nego što je predstavlja sadašnji manji nedostatak zbog suviše kratkog vremena odjeka. Međutim, u dvorani kakva je danas svako povećanje vremena odjeka na srednjim frekvencijama bilo bi popraćeno povećavanjem i na niskim frekvencijama. Možda bi veće povećanje na niskim frekvencijama, ili čak samo na niskima, bilo najefikasniji način da se poveća punoća zvuka. Kritičke se primjedbe o nedostatku punoće odnose jedino na glasnija mjesta romantičke ili zborske glazbe, a takvih koncerata s velikim zborovima ima relativno malo. Taj se nedostatak ne pojavljuje uvijek. Možda je to jednostavno zato što je u tolikom volumenu većina orkestara za tu vrstu muzike premalena. Ili se možda apsorpcija nekih površina mijenja s intenzitetom zvuka."

Kako bi se zadovoljila potreba da vrijeme odjeka na niskim frekvencijama bude dulje, 1964. godine počeo se ugrađivati elektroakustički sistem. On je u početku bio eksperimentalnog karaktera, nekoliko godina se poboljšavao, a zatim je postao stalni sastavni akustički element u dvorani. Pri tome nije upotrijebljeno magnetofonsko zakašnjavanje, kao što je dotada bilo uobičajeno, već sasvim novo rješenje, nazvano *pomoćna rezonancija*. U strop su ugrađena 172 elektroakustička sistema.



Sl. 4.111. Povećavanje vremena odjeka na frekvencijama nižima od 1000 Hz u dvorani Royal Festival Hall uz upotrebu elektroakustičkog uređaja za pomoćnu rezonanciju

Svaki od njih sastavljen je od mikrofona, pojačala i zvučnika, i svaki prenosi svoj uski pojas frekvencija. Da bi se to postiglo, mikrofon je u Helmholtzovu rezonatoru faktora dobrote oko 30, s ovim rasporedom pojasnih širina: 2 Hz za frekvencijsko područje 58—150 Hz, 3 Hz za 150—180 Hz i 4 Hz za 180—300 Hz. Na frekvenci-

jama od 300 do 700 Hz prenošena pojasna širina je 5 Hz, što je postignuto pomoću cijevi četvrtvalne duljine stavljene pred mikrofon. Između mikrofona i pojačala smješten je fazni zakretač, a između pojačala i zvučnika širokopojasni filtar. Mikrofon je od zvučnika udaljen dvadesetak metara. Pojačanje pojedinog kanala ugođeno je tako da bude nekoliko decibela manje od onoga koje uzrokuje oscilacije. Mikrofoni su postavljeni na ona mjesta u dvorani gdje se pojavljuju trbusi stojnih valova. Tim elektroakustičkim sistemom *ne dovodi se zvučna energija*. On djeluje suprotno apsorpciji, čime se produljuje vrijeme odjeka (sl. 4.111). Osim toga poraste i glasnoća jer se povećava broj smjerova iz kojih slušatelj prima zvuk.

Dok se sistem ispitivao i ugađao, pokazalo se da vrijeme odjeka koje se dobiva pojedinim kanalom nije konstantno. Zato ispravan rad takva elektroakustičkog sistema vrlo mnogo ovisi o stručnosti osobe kojoj je povjeren. Prijeko je potrebno ne samo dobro poznavanje elektroakustike nego i poseban smisao za specifične probleme koji se pojavljuju pri upotrebi elektroakustike u muzici.

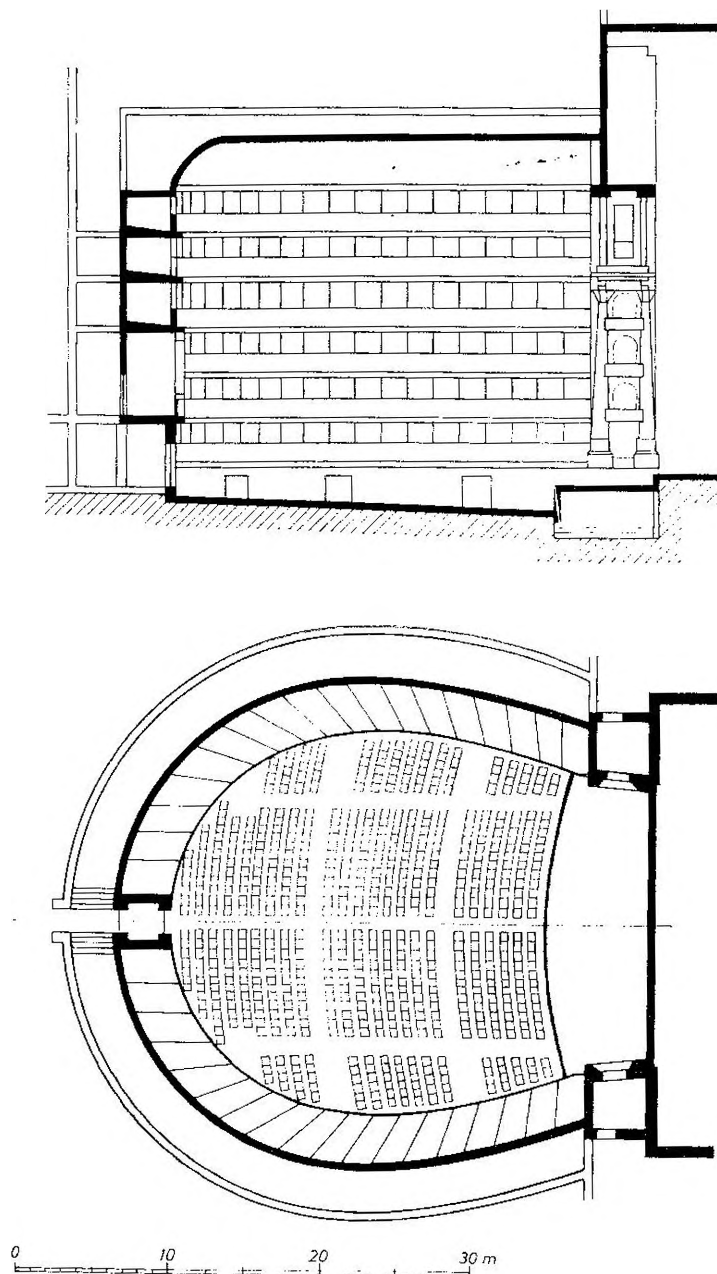
4.10.4. Kazališna dvorana

Kao primjer nećemo uzeti modernu građevinu, već jednu koja je sagrađena još 1778. godine, a to je milanski *Teatro alla Scala*. Ta operna kuća nije postigla svjetski glas samo umjetničkim dostignućima već i akustičkim osobinama dvorane. „Scala' je sagrađena prema projektu arhitekta *Piermarinija*. Godine 1943. teško je oštećena bombama, ali je 1946. popravljena i dovedena u nekadašnje stanje. Iako građena prije gotovo dvjesta godina, može u mnogo čemu još danas poslužiti kao uzor.

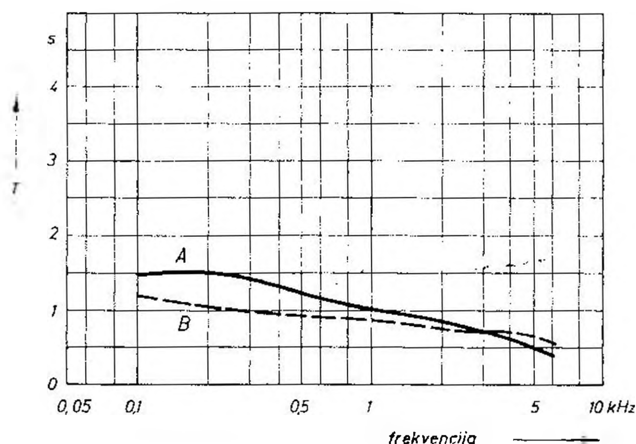
Kao što se zapaža na sl. 4.112, kazalištu je dan oblik potkove. Parter se jednoliko uzdiže prema stražnjoj strani. Uokolo je smješteno šest redova loža. Time je postignuto da nijedan slušalac, a stane ih vrlo mnogo, nije od pozornice udaljeniji više od 25 m. Jedino se toj koncepciji gradnje može prigovoriti što posjetioci u ložama koje su sprijeda ne vide dobro pozornicu. Strop je ravan te služi kao reflektor zvuka. Zanimljivo je da je arhitekt upotrijebio upravo ravan strop, iako su se u ono vrijeme, pa i mnogo poslije toga, kazališta gradila s kupolastim stropom, što je bio uzrok lošim akustičkim osobinama tih dvorana. Udubina za orkestar pomaknuta je daleko u parter, što je akustički osobito povoljno za violine.

Volumen je „Scale" gotovo 10 000 m^3 i prima 3 200 osoba, što znači da specifični volumen iznosi nešto više od 3 m^3 po osobi. Frekvencijsku karakteristiku vremena odjeka vidimo na sl. 4.113. Na frekvenciji od 1 000 Hz vrijeme odjeka iznosi 1 s, a na niskim frekvencijama ono dostiže 1,5 s. Takva karakteristika vremena odjeka gotovo je optimalna za govor. Za glazbu bi bilo potrebno da vrijeme odjeka ima višu vrijednost. Zato je u novije vrijeme u „Scali" ugrađen vrlo složen razglasni uređaj koji ne služi samo za dobivanje kazališnih efekata već i zato da se uz pomoć specijalnoga *magnetofonskog aparata za zakašnjavanje zvuka* dobije efekt kakav odgovara velikoj dvorani. Takav postupak kojim se povećava odjek u nekoj dvorani naziva se *ambiofonija*. Sl. 4.114. predočuje načelnu shemu takva uređaja. Iza mikrofona koji primaju zvuk orkestra signali se dovode miješalu, a nakon toga magnetofonskoj glavi za snimanje. Vremensko zakašnjavanje postiže se pomoću nekoliko glava za reprodukciju koje na različitim razmacima od glave za snimanje primaju signal s vrpčane petlje. Signal se s pojedine glave pojačava i privodi zvučnicima. Vrijeme kašnjenja (koje se može regulirati mijenjajući razmak između glava) i pojačanje u pojedinom kanalu ugodi se tako da se dobije potrebno „vrijeme odjeka".

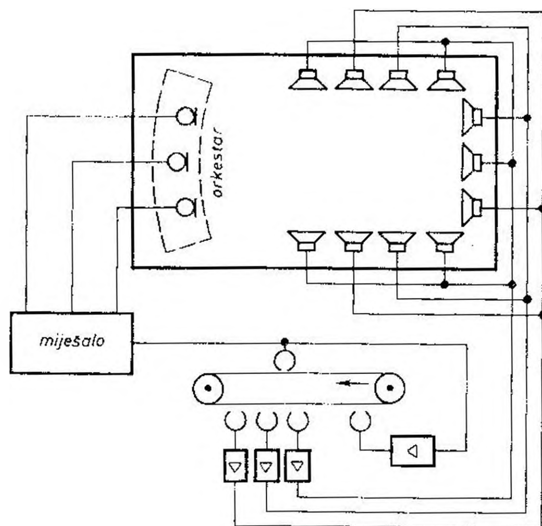
Kao nedostatak tog postupka kojim se produljuje vrijeme odjeka može se spomenuti da se efekt produljenog odjeka dobiva samo dok orkestar svira. Nakon prestanka sviranja ostaje u dvorani njezin vlastiti maleni odjek.



Sl. 4.112. Presjek i tlocrt gledališta „Scale“ u Milanu



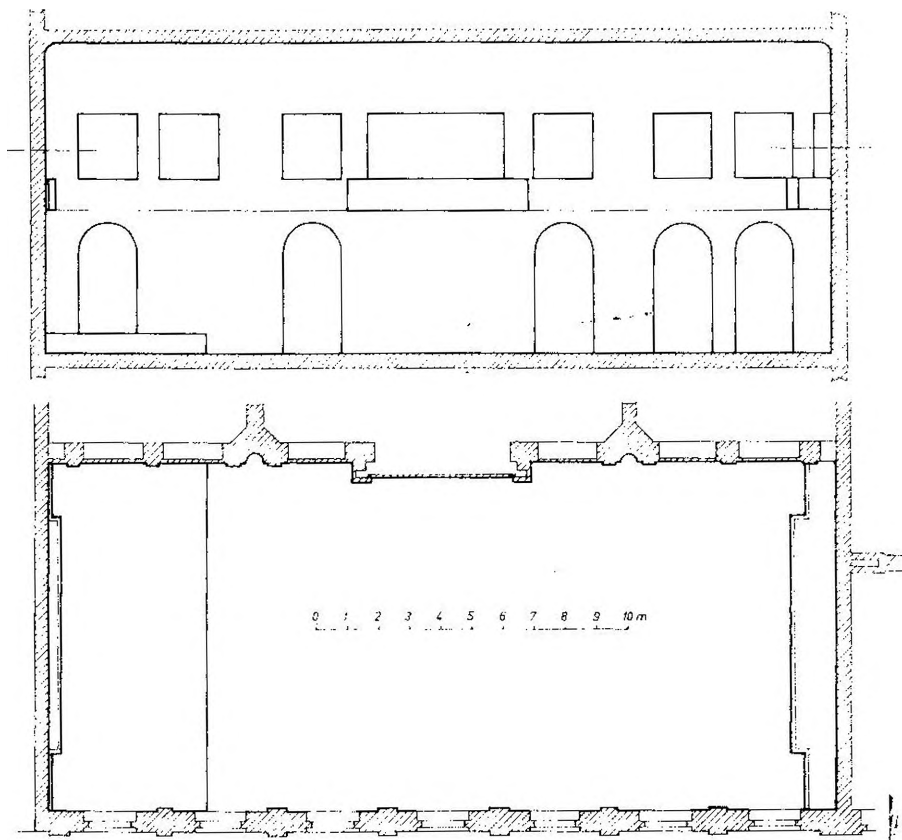
Sl. 4.113. Frekvencijske karakteristike vremena odjeka dvaju kazališta: A — La Scala u Milanu, B — Théâtre Municipal u Genfu



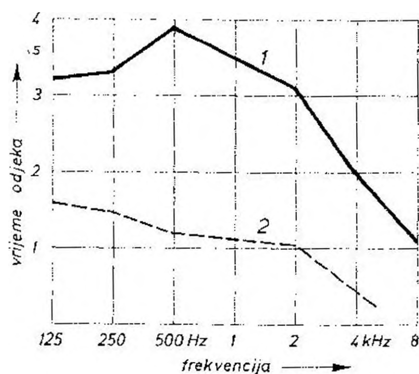
Sl. 4.114. Shema elektroakustičkog uređaja kojim se povećava vrijeme odjeka (ambiofonija)

4.10.5. Koncertna dvorana Hrvatskoga glazbenog zavoda

Najstarija zagrebačka koncertna dvorana je dvorana *Hrvatskoga glazbenog zavoda*. Prvi koncert održan je u njoj 4. prosinca 1876, dakle pred stotinu godina. Dvorana je paralelepipedna oblika. Na lijevoj su joj strani prozori prema ulici, a na desnoj strani dolje ima ostakljena vrata prema bočnim prostorijama i gore duboke lože (4.115).



Sl. 4.115. Presjek i tlocrt koncertne dvorane Hrvatskoga glazbenog zavoda u Zagrebu



Sl. 4.116. Frekvencijske karakteristike koncertne dvorane Hrvatskoga glazbenog zavoda: 1 — mjerena karakteristika prazne dvorane i 2 — karakteristika pune dvorane dobivena računski

S volumenom od 2 700 m³ dvorana može primiti 500 slušatelja koji sjede na običnim pomičnim stolcima. Volumen po osobi (uzimajući u obzir i glazbenike) iznosi 5 m³. Omjer volumena dvorane prema površini koju pokrivaju osobe (publika i muzičari) iznosi 11 (m). Frekvencijska karakteristika vremena odjeka prazne dvorane prikazana na sl. 4.116. dobivena je mjerenjem po oktavnim pojasovima, dok je karakteristika za punu dvoranu dobivena računski.

4.10.6. Koncertna dvorana „Vatroslav Lisinski"

Koncertna dvorana „*Vatroslav Lisinski*" u Zagrebu završena je 1973. godine. Svečano otvorenje bilo je 29. prosinca iste godine. Projektanti zgrade su *inž. arh. Marijan Haberle, arh. Minka Jurković* i *arh. Tatiana Zdvorak*. Dajmo riječ inž. arh. Haberleu:

„Gradnja jedne koncertne dvorane dolazi u red najtežih zadataka, čak mnogo težih od gradnje kazališne zgrade. Zakonitosti su mnogo strože jer takva dvorana mora biti apsolutno akustična, što se postiže s mnogo napora. Već je u samom zadatku postavljeno da palača mora imati veliku dvoranu za otprilike dvije tisuće ljudi i jednu malu za koncertne izvedbe koja bi, zbog nedostatka sredstava da se sagradi još jedna, morala poslužiti i kao dvorana za pokuse.

Oblik dvorane bio je zadan već u propozicijama natječaja, što znači da je trebalo zadovoljiti akustičke uvjete. Dakako, već smo od prvog dana angažirali *inž. Alberta Pregernika*, akustičara, koji je inzistirao na tome da kao glavnog konzultanta pozovemo *prof. Heinricha Keilholza* iz Hannovera. Dvorana je izvedena u drvu, koje još više pojačava mogućnost dobre akustike. Dobila je i akustične difuzore na zidovima te ovješeni akustični svod na stropu, koji je zbog toga što mora biti čvrst, tvrd i jak, izrađen od gipsa kao ovjes koji visi iz konstrukcije još jednog svoda, odnosno drugog stropa dvorane.

Nestrpljivo smo očekivali prof. Keilholza da ispita i ocijeni postignutu akustiku. Kad su se dvoranom razlegli prvi zvuci, prof. Keilholz je digao ruke u zrak i uzviknuo: „Bravo, bravo! Izvrsna akustika"! Treba li da kažem koliko sam u tom trenutku bio sretan i zadovoljan?" (iz članka „Blještavi dragulj umjetnosti", časopis „Studio", br. 631, str. 21, 1976).

Vertikalni presjek i tlocrt dvorane „Vatroslav Lisinski" prikazan je na sl. 4.117. Volumen je 16 000 m^3. U auditoriju ima mjesta za 1 852 slušatelja. Na podiju se može smjestiti pun sastav suvremenoga simfonijskog orkestra i zbor od stotinu pjevača u sjedećem položaju. Volumen po osobi je 8,7 m^3, a omjer volumena prema površini koju zauzimaju osobe ima vrijednost od 14 (m). Srednje vrijeme odjeka* u frekvencijskom području od 500 do 1 000 Hz iznosi 2,2 s.

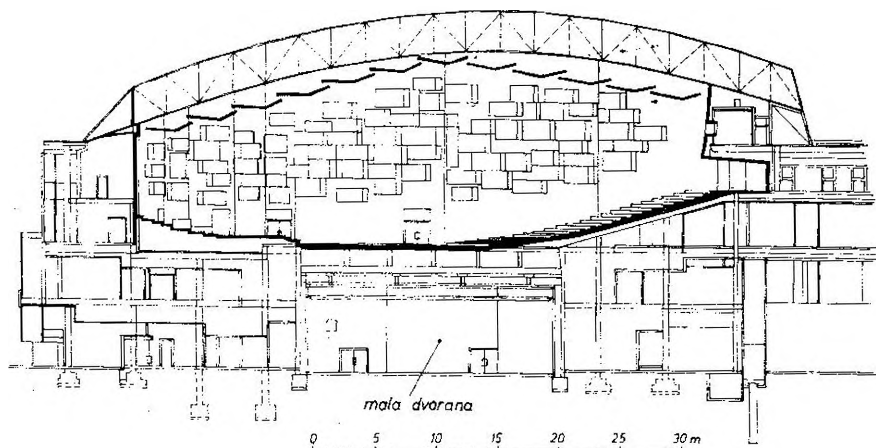
Dijagram na sl. 4.118. sadržava frekvencijske karakteristike vremena odjeka. Krivulja 1 odnosi se na praznu dvoranu, a krivulja 2 na oko tri četvrtine popunjenu. Iz krivulje koja vrijedi za pretežno punu dvoranu može se zaključiti da je srednje vrijeme odjeka općenito preveliko, a i to da oblik krivulje ne zadovoljava. Budući

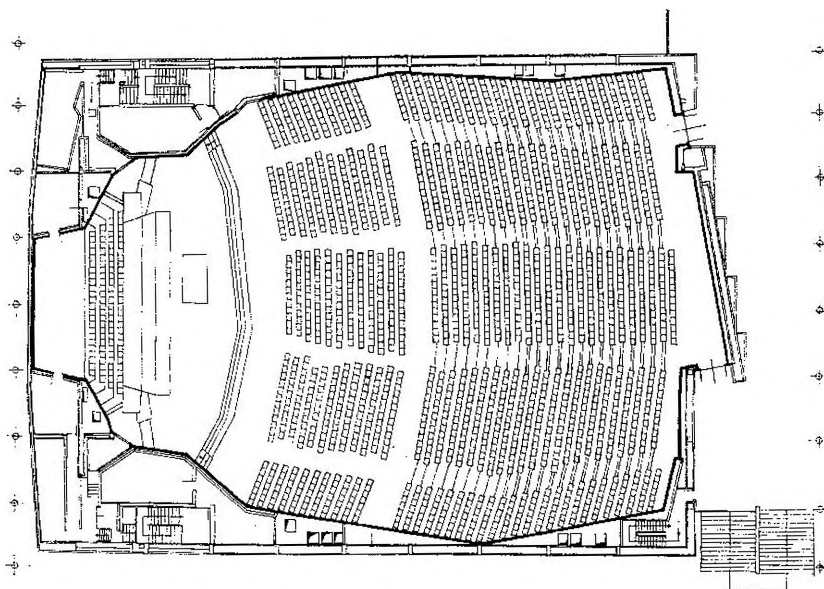
* Od koncertnih dvorana koje su u akustičkom pogledu ocijenjene kao odlične, najveće srednje vrijeme odjeka imaju *Grosser Musikvereinsaal* u Beču i *Tanglewood Music Shed* u Lenoxu, Massachusetts. U tih dvorana, s publikom, srednje vrijeme odjeka iznosi 2,05 s.

Otvorenje dvorane *Grosser Musikvereinsaal* pada čak u godinu 1870. Volumen joj je 15000 m^3 i ima 1680 sjedala. Vrijeme odjeka ima ove vrijednosti: 67 Hz — 2,4 s (3,5 s), 125 Hz — 2,4 s (3,1 s), 250 Hz — 2,2 s (3,3 s), 500 Hz — 2,1 s (3,7 s), 1000 Hz — 2,0 s (3,5 s), 2000 Hz — 1,9 s (3,1 s), 4000 Hz — 1,6 s (2,2 s), 6000 Hz — 1,3 s (1,7 s) (u zagradama su vrijednosti vremena odjeka prazne dvorane). Mnogi eksperti ocijenili su tu dvoranu najboljom na svijetu za muziku iz romantičkog i kasnog klasičnog perioda.

Dvorana *Tanglewood Music Shed*, sagrađena godine 1938, u prvo vrijeme nije imala dobre akustičke osobine. Godine 1959. dograđena je za orkestar akustička školjka i stropni akustički reflektor što je bitno poboljšalo akustičke kvalitete dvorane. U volumenu od 42450 m^3 može se smjestiti čak 6000 slušatelja. Vrijeme odjeka je s ovim vrijednostima: 125 Hz — 2,6 s (4,7 s), 250 Hz — 2,5 s (4,5 s), 500 Hz — 2,25 s (4,0 s), 1000 Hz — 1,85 s (3,0 s), 2000 Hz — 1,7 s (2,5 s), 4000 Hz — 1,6 s (2,4 s), 6000 Hz — 1,4 s (u zagradama vrijeme odjeka prazne dvorane). Godine 1960. sagrađena je posebna školjka za komorni orkestar, tako da 4000 do 6000 ljudi može u toj dvorani slušati mali orkestar koji inače svira za auditorij od 1000 slušatelja.

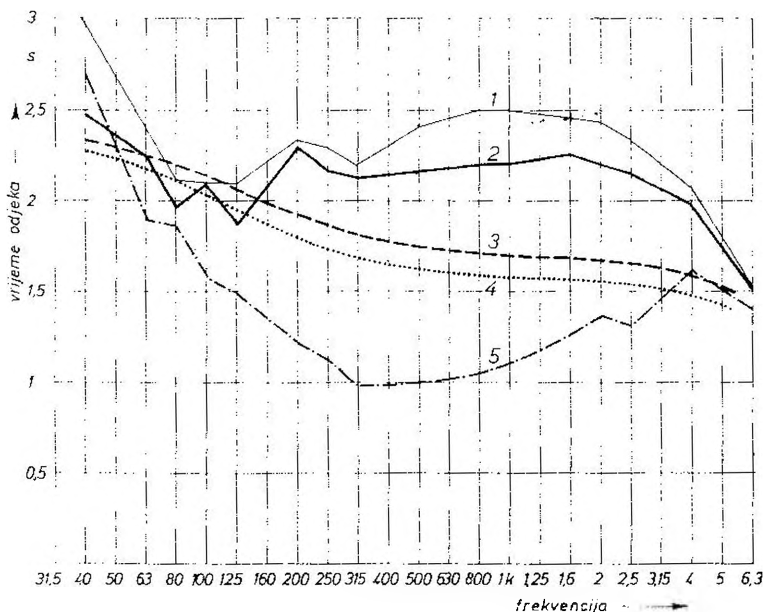
da je dvorana određena za višestruku namjenu, povoljno bi bilo srednje vrijeme odjeka od 1,7 s (krivulja 3), ili čak 1,6 s (krivulja 4). Ima koncertnih dvorana koje i uz takvo, relativno malo srednje vrijeme odjeka imaju izvrsne akustičke osobine za simfonijsku muziku („Stadt-Casino" u Baselu, „Carnegie Hall" u New Yorku i dr.).





Sl. 4.117. Presjek i tlocrt Koncertne dvorane „Vatroslav Lisinski" u Zagrebu

Ispod velike dvorane „Vatroslav Lisinski" smještena je *mala dvorana* volumena od 2 400 m³ i mjesta za 313 slušatelja. Frekvencijska karakteristika vremena odjeka prazne dvorane predočena je krivuljom 5 na sl. 4.118. Očiti su nedostaci karakteristike vremena odjeka.



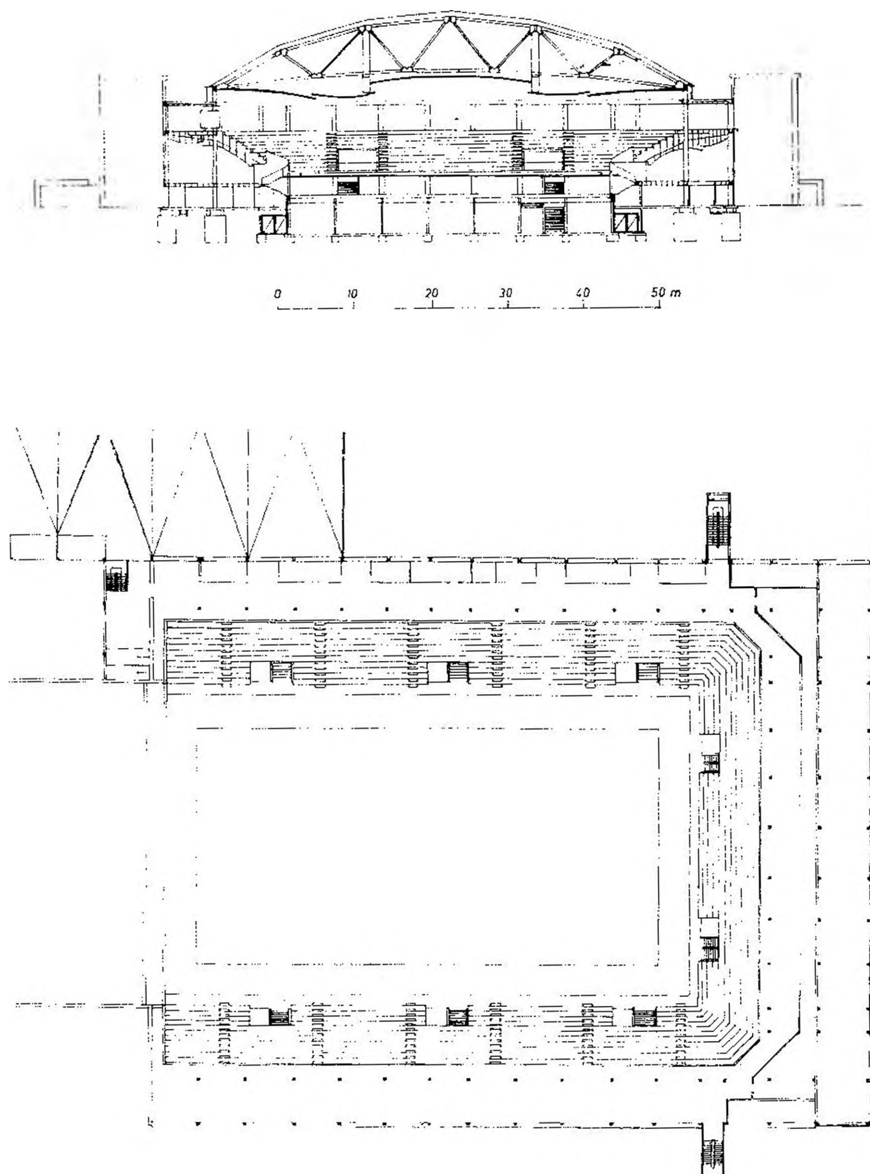
Sl. 4.118. Frekvencijske karakteristike vremena odjeka dvorane „Vatroslav Lisinski": 1 — prazna dvorana, 2 — dvorana ispunjena do tri četvrtine, 3 — poželjna karakteristika pune dvorane sa srednjim vremenom odjeka $(T_{500} + T_{1000})/2$ s vrijednošću od 1,7 s, 4 — isto kao za 3, samo sa srednjim vremenom odjeka od 1,6 s i 5 — karakteristika vremena odjeka prazne male dvorane, smještene ispod velike

4.10.7. Sportska dvorana

Gradnja *Doma sportova* u Zagrebu završena je 1974. godine. Velika dvorana u toj zgradi može primiti 6 000 gledalaca. Vertikalni joj je presjek i tlocrt na sl. 4.119. Ona je namijenjena u prvom redu sportovima i priredbama na ledu, ali je pogodna i za druge sportove, kao košarku, odbojku, boks, tenis, zatim za zabavne glazbene priredbe, kongrese itd. U svim tim slučajevima valja osigurati dobro slušanje, i to bilo da se koristi razglasom ili se sluša izravno. Budući da je ta dvorana izgrađena od betona, njezino vrijeme odjeka bilo je vrlo veliko, pa se morala akustički obraditi. Prema akustičkom projektu *prof. dra Branka Someka* izgrađen je spušteni strop, sastavljen od apsorpcijskih elemenata koji se nabavljaju kao industrijski proizvod.

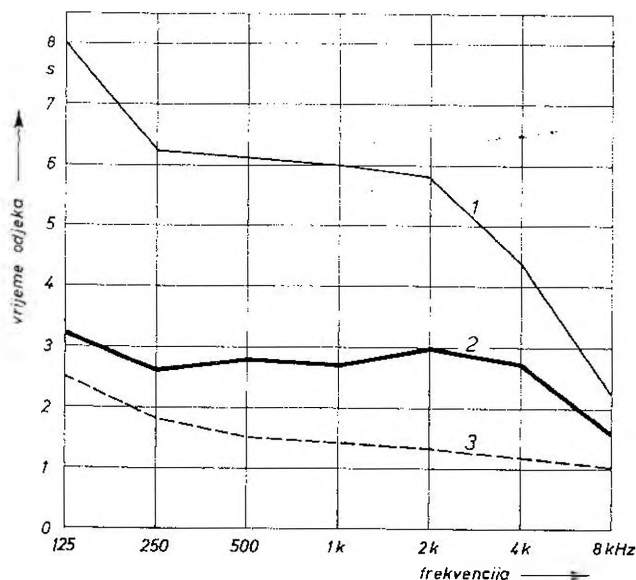
Dodavši spušteni strop postignuto je, prvo, znatno manje vrijeme odjeka i, drugo, bitno su poboljšani uvjeti zagrijavanja jer on istodobno služi kao izolacijski sloj između betonskog krova i dvorane. Uz te pogodnosti još je time i volumen dvorane smanjen. Krivulje na sl. 4.120. prikazuju mjerene frekvencijske karakteristike

vremena odjeka bez spuštenog stropa (1) i s njim (2). Frekvencijska karakteristika koju prikazuje karakteristika 3 odnosi se na potpuno ispunjenu dvoranu, a dobivena je računski.



Sl. 4.119. Poprečni presjek i tlocrt velike sportske dvorane u Domu sportova u Zagrebu

Sve tri krivulje na sl. 4.120. vrijede uz nepokrivenu lednu površinu. Ako se iskoristi i ta površina, dvorana može primiti oko 10 000 gledalaca, pa se vrijeme odjeka još više smanji.



Sl. 4.120. Frekvencijske karakteristike vremena odjeka velike sportske dvorane u Domu sportova u Zagrebu: 1 — prije akustičke obrade, 2 — nakon akustičke obrade i 3 — uz punu dvoranu (dobiveno računski)

U maloj dvorani Doma sportova održavaju se natjecanja u tzv. malim sportovima (rukomet, košarka, tenis, boks, itd.). Dvorana je prikladna i za neke muzičke i druge priredbe kao što su koncerti narodne i zabavne glazbe, mjuzikli i revije. U volumenu od oko 24 000 m^3 dvorana ima nešto preko 3000 sjedala, a kad se na borilište postave stolci može primiti i do blizu 4 000 posjetilaca. Povećana apsorpcija na niskim frekvencijama postignuta je stropom od valovita lima i kasetiranom izvedbom borilišta. Ploča borilišta ne leži, naime, na tvrdoj podlozi, već na okvirima različite veličine, čime je postignuto da je ploča u određenoj mjeri elastična, i da zbog rezoniranja na različitim niskim frekvencijama povećava apsorpciju u tom frekvencijskom području. Vrijeme odjeka prazne dvorane na srednjim frekvencijama iznosi 2,1 s, pa je uz ispunjenu dvoranu dovoljno nisko.

Glava peta

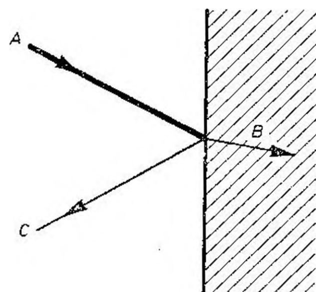
APSORPCIJSKI MATERIJALI I APSORPCIJSKE KONSTRUKCIJE

Sve plohe, svi materijali i predmeti u nekoj prostoriji apsorbiraju zvuk. Kad se govori o apsorpcijskim materijalima ili o apsorpcijskim konstrukcijama misli se na one kojima je osnovni zadatak da svojim akustičkim svojstvima proizvedu kontroliranu apsorpciju. Svrha je takvih akustičkih materijala i konstrukcija u praksi da:

1. skrate vrijeme odjeka;
2. otklone pojave jeke;
3. priguše buku.

Zvuk se u nekom materijalu apsorbira na taj način što se *pretvori u drugi oblik energije* i, konačno, *u toplinu*. Kad zvučni val udari u neku plohu, jedan se dio zvučne energije reflektira, a ostatak se apsorbira (sl. 5.1). Pod koeficijentom refleksije r razumijeva se odnos amplitude tlaka reflektiranog vala prema amplitudi tlaka upadnog vala. Koeficijent apsorpcije α definiran je odnosom apsorbirane prema upadnoj zvučnoj energiji. Kako je zvučna energija razmjerna kvadratu amplitude tlaka, za koeficijent apsorpcije vrijedi:

$$\alpha = 1 - r^2$$

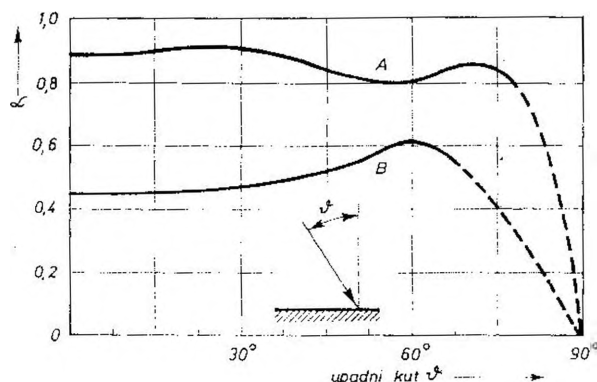


Sl. 5.1. Od upadnog zvuka A koji udari u zid dio B se u zidu apsorbira, a ostatak se reflektira u prostor.

Koeficijent apsorpcije ovisi o kutu upada zvučnog vala (sl. 5.2). Ta se poteškoća uklanja time što se računa sa „statističkim" koeficijentom apsorpcije, koji vrijedi kao srednja vrijednost za statistički raspodijeljene kutove upada. Time koeficijent apsorpcije postaje konstanta određenoga akustičkog materijala.

Bolje nego pomoću koeficijenta apsorpcije mogu se akustičke osobine apsorpcijskih materijala opisati *akustičkom impedancijom.* Ona je definirana kompleksnim

odnosom zvučnog tlaka i odgovarajuće titrajne brzine čestica na površini materijala. No matematička obrada problema u akustici prostorija uz pomoć akustičke impedancije vrlo je složena pa za normalnu praksu nije prihvatljiva (vidi *Prilog* 4).

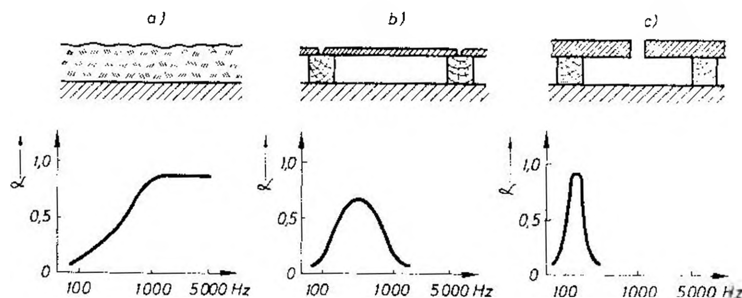


Sl. 5.2. Ovisnost koeficijenta apsorpcije o upadnom kutu zvučnih zraka na frekvenciji od 1000 Hz: A — sloj staklene vune debljine od 4,5 cm i B — sloj staklene vune debljine od 2 cm

U praktičkoj arhitektonskoj akustici susreću se tri vrste apsorbera (sl. 5.3):

1. porozni;
2. membranski;
3. rezonatorski.

Svaku vrstu apsorbera razložit ćemo opširnije.



Sl. 5.3. Shematski prikaz: a) poroznoga, b) membranskog i c) rezonatorskog apsorbera i frekvencijske karakteristike njihovih koeficijenata apsorpcije

5.1. POROZNI APSORBERI

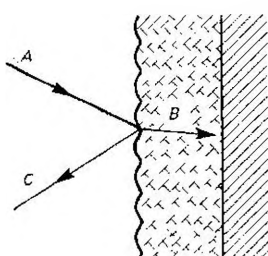
Tipični porozni apsorpcijski materijali su tekstilni produkti od vune, pamuka i svile, izrađevine od biljnih niti (koks, juta i dr.), mineralna vuna, strugotine od drveta, staklena vuna, azbest itd. U njima se zvuk apsorbira na taj način što on potakne zrak u porama na titranje pa se trenjem zraka o stijenke pora zvučna energija „poništava", tj. pretvara u toplinu. Ona se u porama troši i zbog razmjene

topline između stijenki materijala i ugrijanoga komprimiranog, ili ohlađenoga razrijeđenog zraka.

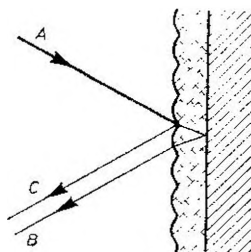
Koeficijent apsorpcije poroznih materijala ovisi o:

1. debljini sloja;
2. frekvenciji;
3. otporu strujanju;
4. poroznosti;
5. faktoru strukture.

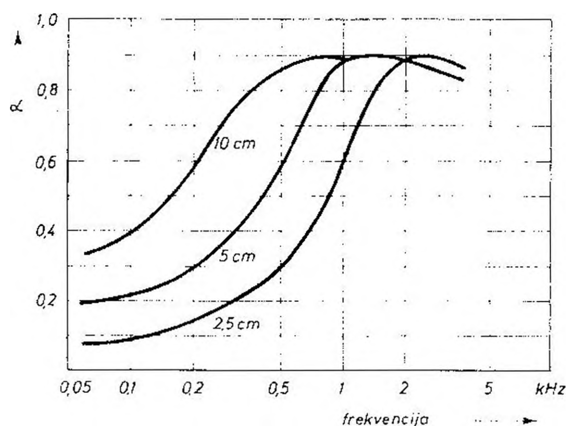
U debljemu poroznom sloju (sl. 5.4) apsorbira se cijela zvučna energija koja prodre u sloj, pa je koeficijent određen samo reflektiranim dijelom. Ako je sloj tanak (sl. 5.5), jedan se dio zvučne energije (koji prođe kroz sloj) reflektira od tvrde stijene, pa je koeficijent apsorpcije manji. Na sl. 5.6, vidi se kako s debljinom sloja raste apsorpcija.



Sl. 5.4. U debelom sloju poroznog apsorbera cijela se zvučna energija koja prodre u sloj apsorbira, pretvori u toplinu.



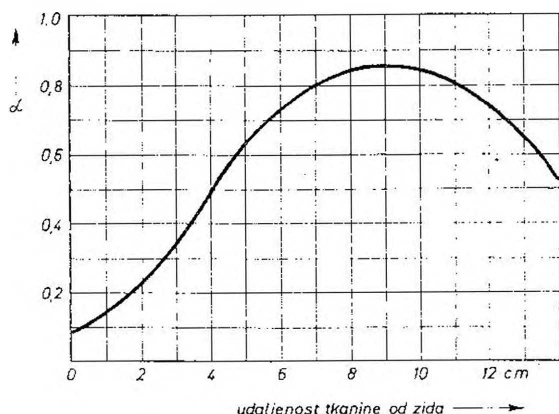
Sl. 5.5. Kroz tanak porozni sloj zvučni valovi prodiru do stijene i od nje se odbijaju.



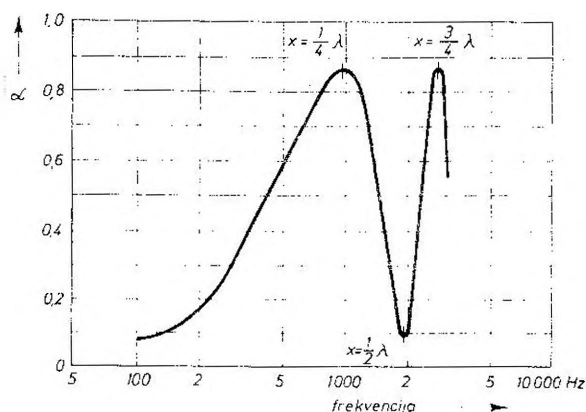
Sl. 5.6. Frekvencijske karakteristike koeficijenata apsorpcije za sloj pusta (filca) različite debljine

Porozni sloj ne mora po cijeloj svojoj debljini biti homogen. Ako se postavi na stanovitom razmaku ispred tvrde stijene, prednost mu je u tome što jače apsorbira niže frekvencije. Na sl. 5.7. dijagram predočuje ovisnost koeficijenta apsorpcije o udaljenosti tankoga tekstilnog sloja od tvrde stijene, i to za jednu frekvenciju (950 Hz). Maksimalna vrijednost postiže se na razmaku koji je jednak četvrtini valne duljine. Pri tome je tekstilni sloj na mjestu najveće titrajne brzine zračnih čestica, pa je efekt prigušivanja najveći. Sl. 5.8. prikazuje za isti slučaj ovisnost koeficijenta apsorpcije o frekvenciji, i to uz vertikalan upad zvuka. Maksimum se

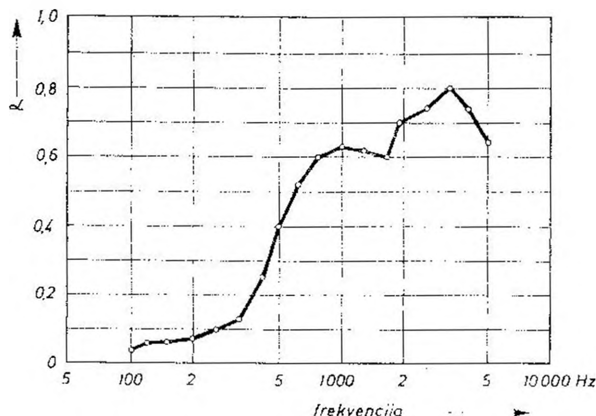
postiže na onim frekvencijama gdje je razmak izmedu sloja i stijene četvrtina, odnosno tri četvrtine valne duljine. Minimalan koeficijent apsorpcije dobiva se uz razmak od pola valne duljine. Budući da u normalnom slučaju zvuk upada na akustički materijal pod svim mogućim kutovima, za ovakav je slučaj dijagram koeficijenta apsorpcije drukčiji (sl. 5.9).



Sl. 5.7. Koeficijent apsorpcije tankog sloja tkanine postavljenoga na raznim udaljenostima od zida. Mjerenje je provedeno cijevnom metodom na frekvenciji od 950 Hz.



Sl. 5.8. Frekvencijska karakteristika koeficijenta apsorpcije tankog sloja tkanine udaljenoga 9 cm od stijene. Mjerenje je provedeno cijevnom metodom.

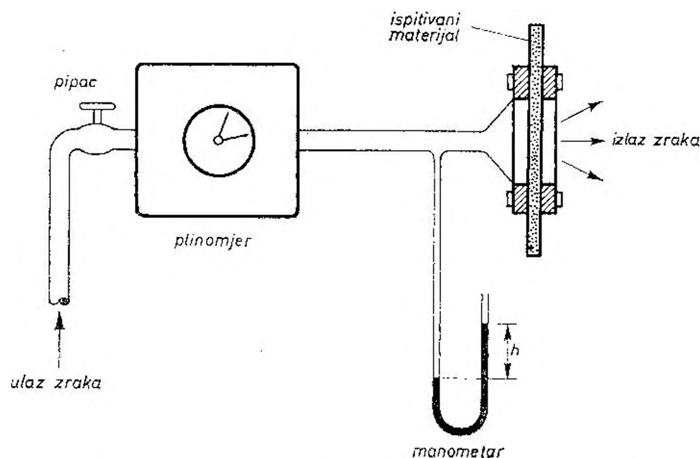


Sl. 5.9. Frekvencijska karakteristika koeficijenta apsorpcije zastora udaljenoga 9 cm od zida. Mjereno je metodom odječne komore.

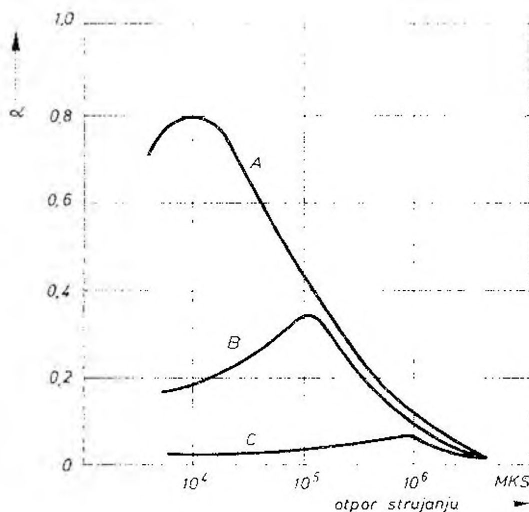
Na osnovi ovih dijagrama izlazi da je koeficijent apsorpcije poroznih materijala na niskim frekvencijama malen. Razlog tome je u odnosu valnih duljina prema dimenzijama pora.

Vješanjem o strop kratkih zastora širokih od 30 do 40 cm, s međurazmakom od 30 do 50 cm, postiže se velika apsorpcija u prostoriji. Takav je postupak naročito pogodan u prostorijama sa staklenim stropom jer zastori ne smetaju ulasku svjetlosti.

Koeficijent apsorpcije poroznih materijala ovisan je o *otporu strujanju*. Kako se taj otpor mjeri prikazano je na sl. 5.10. Količina zraka koja u sekundi prođe kroz materijal mjeri se plinomjerom, a razlika tlaka manometrom. Iz tih podataka i površine uzorka izračuna se specifični otpor strujanju. Dijagrami na sl. 5.11. predočuju kako o tom otporu ovisi koeficijent apsorpcije. Oni vrijede za frekvenciju od 500 Hz i okomiti upad zvuka. Krivulja *A* odnosi se na debljinu sloja od 10 cm i



Sl. 5.10. Shema uređaja za mjerenje otpora strujanju



Sl. 5.11. Ovisnost koeficijenta apsorpcije o otporu strujanju poroznog sloja: A — sloj debljine od 10 cm, B — sloj debljine od 3 cm i C — sloj debljine od 1 cm

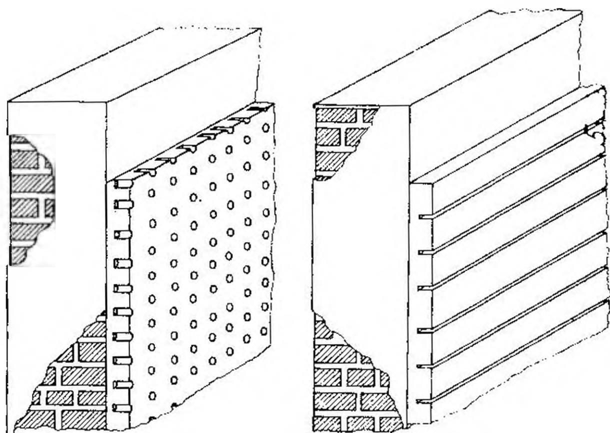
pokazuje da se maksimalan koeficijent apsorpcije od 0,8 dobiva pri otporu strujanju od 10^4 m^{-3} kg s^{-1}. Takav otpor strujanju ima vrlo rastresit sloj od vlakanaca. Koeficijent apsorpcije tvrdo tlačene ploče od drvenih vlakanaca 1 cm debele najveći je pri otporu strujanju od $10^6 m^{-3}$ kg s^{-1} i iznosi manje od 0,1.

Sagovi su tipični materijali s velikom apsorpcijom u području srednjih i visokih frekvencija. Najčešće im je otpor strujanju upravo optimalan, tako da imaju maksimalan koeficijent apsorpcije.

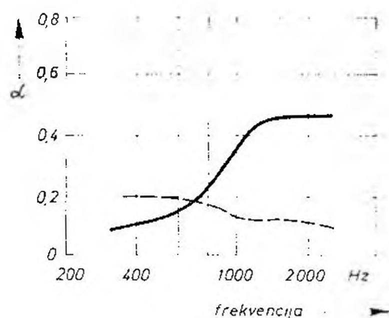
Kao što smo napomenuli, koeficijent apsorpcije ovisi o poroznosti materijala. Poroznost je definirana odnosom volumena zraka u porama i ukupnog volumena. Treba istaknuti da je otpor strujanju neovisan o poroznosti jer uz geometrijsko smanjivanje pora otpor strujanju raste pri istoj poroznosti.

Ta dva činioca, otpor strujanju i poroznost, nisu dovoljna da se karakterizira neki porozni materijal. Kanali u materijalu mogu teći u raznim smjerovima i mogu se završavati slijepo, a to nije obuhvaćeno ni poroznošću ni otporom strujanju. Te geometrijske osobine materijala utječu na višim frekvencijama, što se u račun unosi *faktorom strukture*. Tek uvođenjem tog faktora bilo je moguće rastumačiti veliko apsorpcijsko djelovanje takozvanih *akustik-ploča*. Te ploče imaju uvrte, rupe promjera obično većega od 4 mm, i razmak između njih oko 15 mm, tako da na kvadratni metar dolazi više od 4 000 rupa (sl. 5.12). Izrađuju se i sa žljebovima, a materijal su drvena vlakanca, azbest, vlakanca od stakla itd. Akustik-ploče najrašireniji su akustički materijal, a upotrebljavaju se u školama, bolnicama, uredima, tvornicama, hotelima, svagdje gdje je potrebno prigušiti buku i smanjiti odjek bez specijalnih zahtjeva u pogledu oblika frekvencijske karakteristike odjeka.

Velik utjecaj na koeficijent apsorpcije poroznih materijala može imati sloj boje koja se stavlja iz estetskih razloga. Osobito nepovoljno djeluje uljena boja, kao što pokazuju dijagrami na sl. 5.13. Ako je porozni materijal potrebno obojiti, valja to učiniti naprskavanjem mineralne boje koja se topi u vodi jer ona ne stvara homogen sloj, već oboji samo rubove pora.



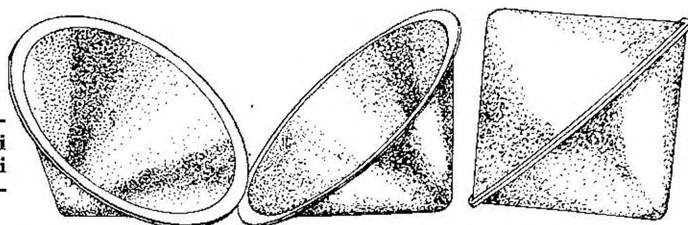
Sl. 5.12. Akustik-ploče: lijevo s okruglim uvrtima, desno s urezanim brazdama



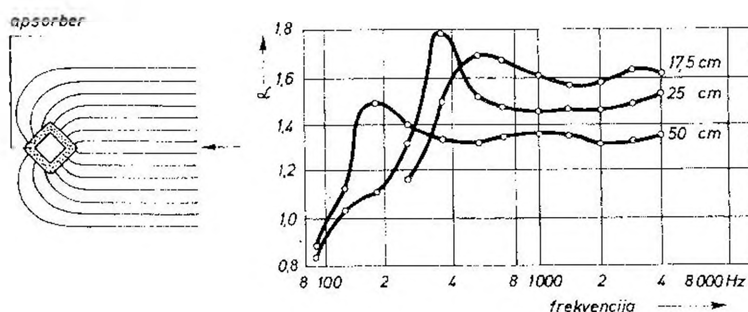
Sl. 5.13. Frekvencijska karakteristika koeficijenta apsorpcije nekoga poroznog materijala neoličene površine (puna linija) i kad je ona premazana uljenom bojom (crtkana linija)

U prostorijama s visokim stropom, kao što su tvorničke hale ili velike radionice, mogu radi smanjenja buke vrlo uspješno poslužiti *ovjesni apsorberi*. Tad se ne mogu upotrijebiti apsorberi uobičajena tipa, ili bi njihovo stavljanje bilo neekonomično.

Ovjesni apsorberi oblika su kutije građene npr. od dva čunja koji se osnovicama dodiruju (sl. 5.14). Posebna im je osobitost u tome što im je zbog difrakcije koeficijent apsorpcije veći od jedan. Na sl. 5.15. frekvencijske su karakteristike takvih konusnih apsorbera različitih promjera. Povećavamo li promjer, raste apsorpcija na nižim, a smanjuje se na višim frekvencijama.

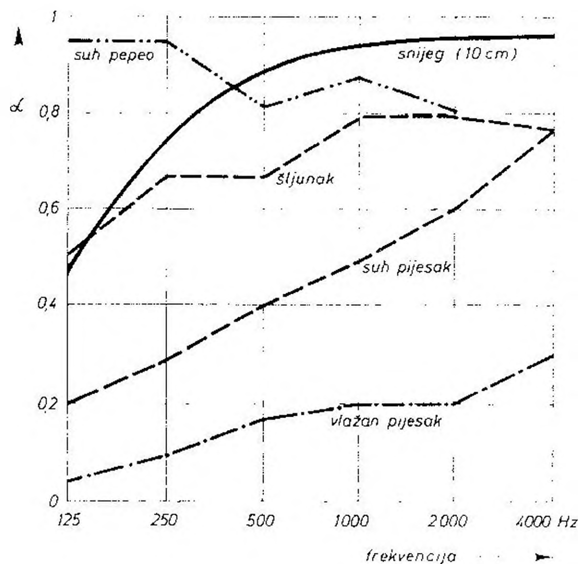


Sl. 5.14. Elementi čunjastog apsorbera (prva i druga slika) i čunjasti apsorber sastavljen (treća slika)



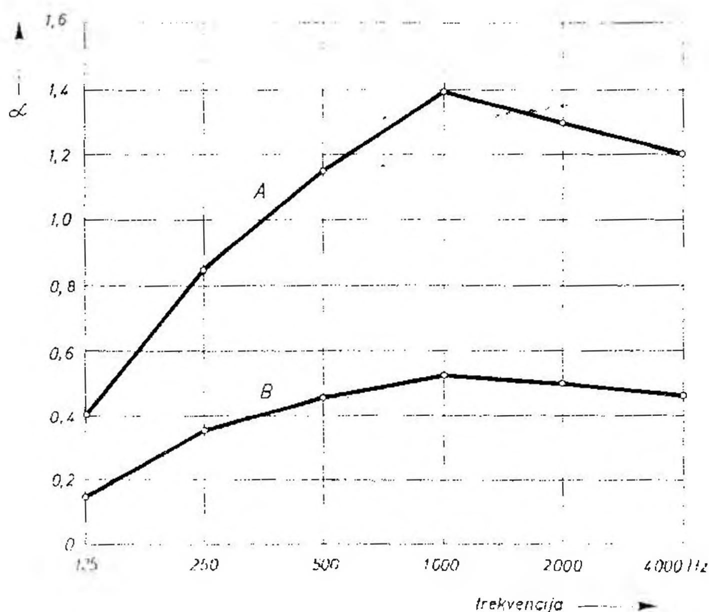
Sl. 5.15. Frekvencijske karakteristike koeficijenta apsorpcije čunjastih apsorbera raznih promjera. Promjer je naznačen uz krivulje.

Dijagramima na sl. 5.16. prikazano je kako koeficijent apsorpcije ovisi o frekvenciji kod pepela, snijega, šljunka i pijeska. Koeficijenti su apsorpcije pepela i snijega visoki, i to prvome osobito na nižim, a drugome na višim frekvencijama.

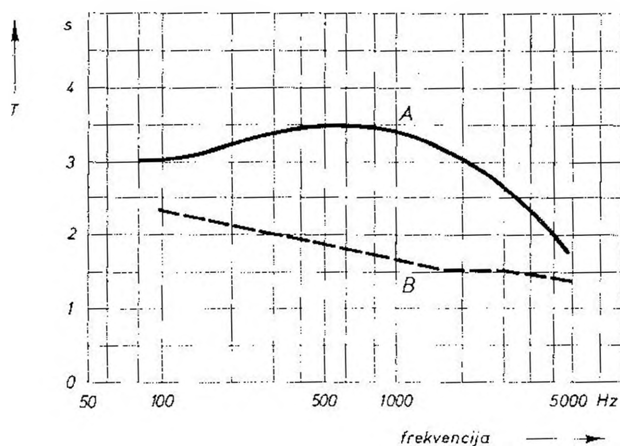


Sl. 5.16. Koeficijenti apsorpcije pepela, snijega, šljunka i pijeska ovisno o frekvenciji

Osobe u prostoriji djeluju kao porozni apsorberi. Koeficijent apsorpcije po osobi, izražen u Sabineovim kvadratnim metrima (ili sabinima), ovisi o tome na kakvim stolicama slušaoci sjede i kakav je njihov međusobni razmak. Prosječan koeficijent apsorpcije ovisno o frekvenciji predočuje dijagram na sl. 5.17. Ako



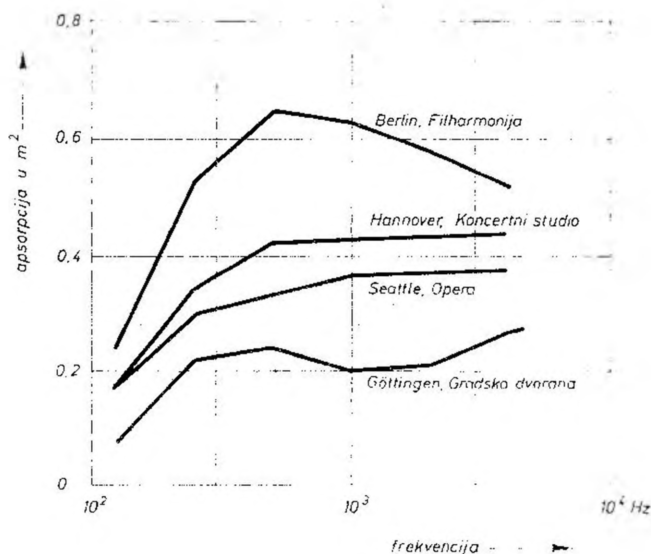
Sl. 5.17. Frekvencijska karakteristika koeficijenta apsorpcije po osobi: A — za muzičare u orkestru i B — za slušatelje koji sjede u redovima



Sl. 5.18. Frekvencijska karakteristika vremena odjeka u dvorani Musiksaal Stadt-Casino, Basel (1876) : A — bez publike i B — s publikom

slušaoci stoje, koeficijent je znatno niži. Za osobe na relativno velikom međusobnom razmaku, npr. svirače u orkestru, dijagram koeficijenta apsorpcije drukčiji je i izražen je također na sl. 5.17.

Budući da je apsorpcija publike vrlo velika, vrijeme odjeka u koncertnim dvoranama praktički je potpuno određeno tom apsorpcijom. Tipičan primjer utjecaja publike na vrijeme odjeka prikazan je u dijagramu na sl. 5.18. Bez publike je vrijeme odjeka u području srednjih frekvencija više od dva puta dulje nego s publikom. Iz dijagrama se također vidi kako je tad frekvencijska karakteristika vremena odjeka bez publike nepovoljna, a s publikom poprima gotovo idealan tok.

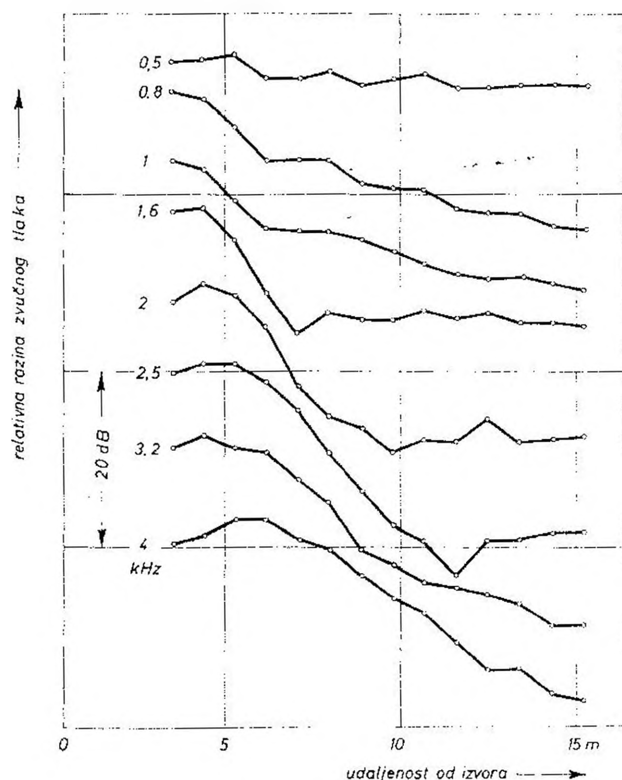


Sl. 5.19. Apsorpcija publike u dvoranama procijenjena na temelju vremena odjeka i izražena u kvadratnim metrima po sjedalu

Općenito se može reći da apsorpcija što je unose slušaoci raste do 2 000 Hz, a iznad te frekvencije opada. Tapetirani stolci, u usporedbi s netapetiranima povećavaju apsorpciju do oko 1 000 Hz, a na višim frekvencijama nema bitne razlike. Zanimljiv je dijagram na sl. 5.19, koji prikazuje kolika razlika može biti u apsorpciji po sjedalu u raznim dvoranama. Može se otčitati da je na frekvenciji od 1 000 Hz apsorpcija po osobi između 0,2 i 0,63. Ta je razlika nastala zbog različitog poretka stolaca i različitog oblika zvučnih polja u dvoranama. Iako procjene o apsorpciji sadržavaju pogreške zbog toga što nisu poznati koeficijenti apsorpcije drugih ploha i materijala, može se sa sigurnošću tvrditi da je auditorij glavni izvor netočnosti kad se izračunava vrijeme odjeka.

Slušaoci u dvorani utječu također na slabljenje zvučnih valova koji se šire paralelno s auditorijem. Rezultati mjerenja uneseni u dijagram na sl. 5.20. pokazuju da na frekvencijama višima od 1 000 Hz naglo opada zvučni tlak, i to već na mjestima gdje su sjedala prednjih redova. U vezi s apsorpcijom auditorija povoljno je, dakle, da se sjedala postupno izdižu prema stražnjem dijelu dvorane, što je i vi-

zualno bolje rješenje. No, pri tome, zbog toga što je auditorij više izložen zvučnim valovima, on više apsorbira zvuk. To, dalje, uzrokuje da se vrijeme odjeka jako skrati.



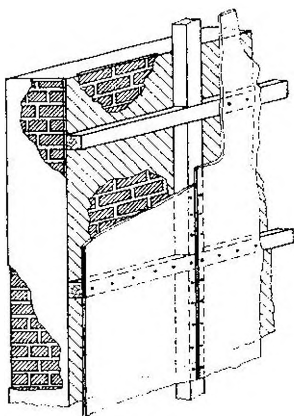
Sl. 5.20. Prigušivanje zvuka koji se širi iznad glava slušalaca. Visina je zvučnog izvora i mikrofona iznad poda 1,15 m.

5.2. MEMBRANSKI APSORBERI

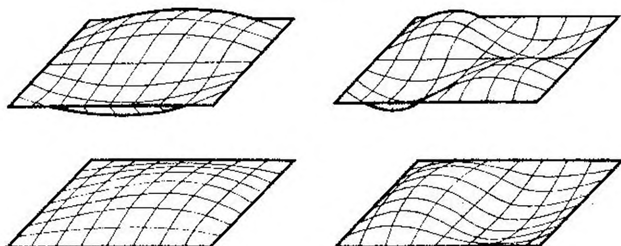
U praksi se membranski apsorberi izvode kako je prikazano na sl. 5.21. Preko rešetke od letava pričvrsti se tanka ploča ili membrana od drveta, ljepenke, kože, uljnog platna i sl. Apsorpcija nastaje tako da dio ploče koji pokriva pojedino polje rešetke pod djelovanjem zvučnih valova titra, na što se troši energija zvuka. Ploča može titrati na više načina, od kojih su neki na sl. 5.22. Najveća apsorpcija nastaje na osnovnoj rezonantnoj frekvenciji. Uz pretpostavku da je ploča dosta tanka i da se prema tome glavni dio elastične sile dobiva od zračnog jastuka koji je zatvoren iza ploče, osnovna rezonantna frekvencija izračuna se po formuli:

$$f_r = 600 \sqrt{\frac{1}{M \cdot d}} \text{ (Hz)} \tag{5.2}$$

Tu je M masa ploče u kg/m², a d visina (debljina) zračnog jastuka u cm. Da bi se točnije izračunala rezonantna frekvencija, trebalo bi poznavati elastična svojstva ploče. Takav račun za praksu ne vrijedi jer elastičnost ploče mnogo ovisi o načinu učvršćivanja i o stupnju homogenosti materijala od kojeg je napravljena.

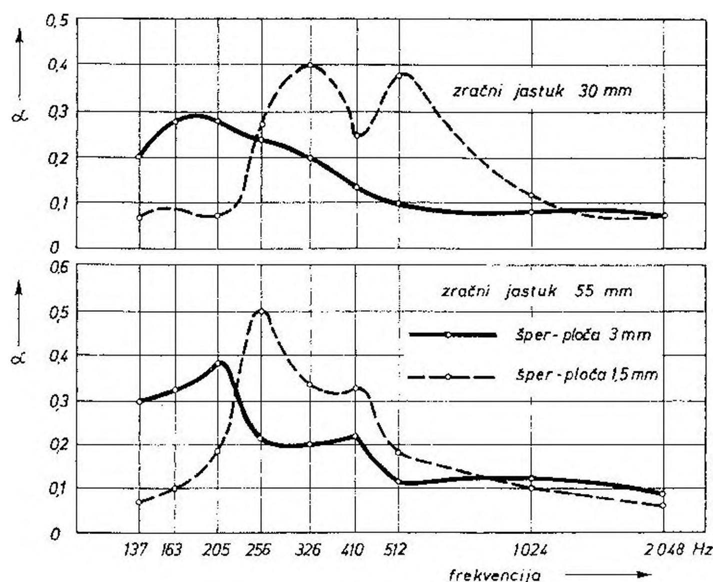


Sl. 5.21. Prikaz jedne konstrukcije membranskog apsorbera



Sl. 5.22. Nekoliko načina titranja ploče

Na sl. 5.23. vidi se kako koeficijent apsorpcije, prema jednom mjerenju, ovisi o frekvenciji pri različitim debljinama zračnog jastuka i raznim debljinama ploče.



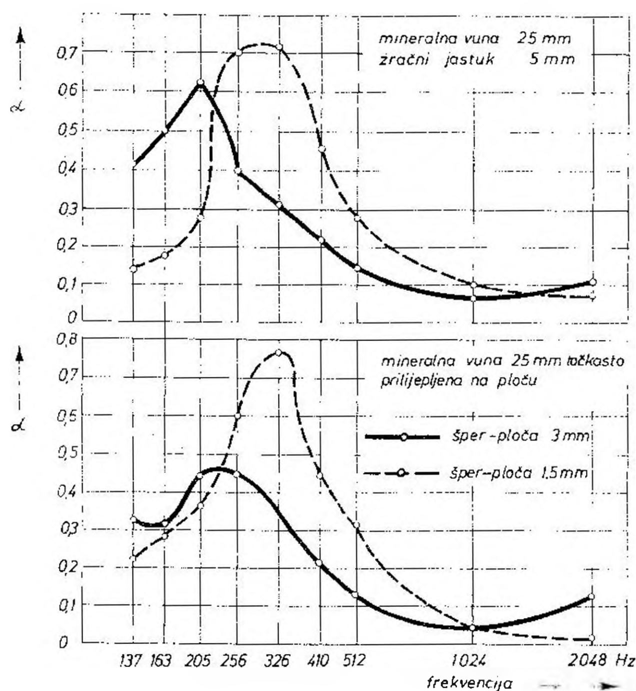
Sl. 5.23. Frekvencijska karakteristika koeficijenta apsorpcije membranskog apsorbera s pločom veličine 60 × 270 cm pričvršćenom na okvir pregradama međusobno udaljenima 90 cm

Koeficijent apsorpcije membranskih apsorbera može se znatno povećati stave li se porozni apsorpcijski materijali u prostor zračnog jastuka. Pri tome nije potrebno da se ispuni cijeli prostor; dovoljno je da se materijal stavi samo uz okvir (sl. 5.24).



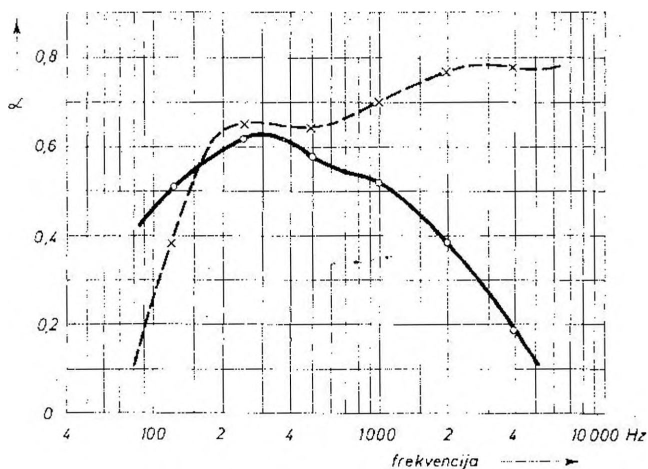
Sl. 5.24. Prigušivanje zatvorenog prostora membranskog apsorbera poroznim materijalom

Apsorpcijski materijal može se i točkasto zalijepiti na ploču. Na sl. 5.25. gore prikazana je ovisnost koeficijenta apsorpcije o frekvenciji membranskih apsorbera jednakih dimenzija kao na sl. 5.23. gore, samo što je zračni jastuk ispunjen 2,5 cm debelim slojem mineralne vune. Dijagram na sl. 5.25. dolje odnosi se na istu konstrukciju za koju vrijedi dijagram na sl. 5.25. gore, jedino je tu mineralna vuna točkasto zalijepljena na stražnju stranu ploče. Iz dijagrama vidi se kako se mijenjanjem debljine ploče, debljine zračnog jastuka i načinom akustičke obrade prostora iza ploče, može znatno utjecati na vrijednost koeficijenta apsorpcije i njegovu frekvencijsku karakteristiku.



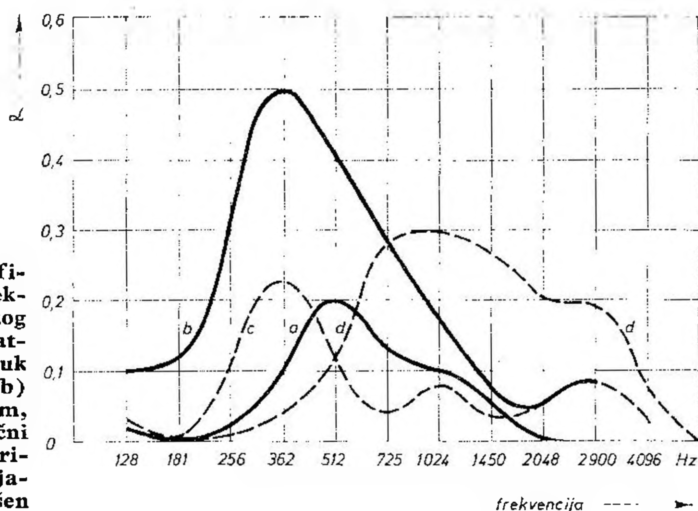
Sl. 5.25. Ovisnost koeficijenta apsorpcije o frekvenciji kod membranskog apsorbera jednakoga onome na sl. 5.23, samo s poroznim apsorberom iza membrane

Posebna je vrsta membranskih apsorbera tanka membrana, npr. od uljnog ili voštanog platna, ili kože, napeta na drvenu rešetku. Tad je elastična sila titrajnog sistema određena jedino zatvorenim zrakom. Dijagram na sl. 5.26. predočuje kako se frekvencijska karakteristika koeficijenta apsorpcije, koja se odnosi na 8 cm debeo sloj mineralne vune, promijenila kad je taj sloj pokriven voštanim platnom. Nakon rezonantne frekvencije od oko 300 Hz koeficijent apsorpcije naglo pada.

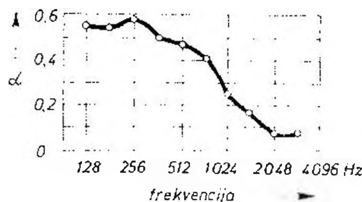


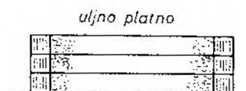
Sl. 5.26. Frekvencijska karakteristika koeficijenta apsorpcije kod sloja mineralne vune debeloga 8 cm. Puna crta odnosi se na isti sloj pokriven voštanim platnom.

Na sl. 5.27. vidi se kako koeficijent apsorpcije membranskog apsorbera s voštanim platnom ovisi o debljini zračnog jastuka i o prigušivanju. Koeficijent apsorpcije kod višestrukoga membranskog apsorbera od uljnog platna kao što prikazuje sl. 5.28, velik je u širokom području niskih frekvencija. Tu je zračni jastuk prigušen samo na rubovima.



Sl. 5.27. Ovisnost koeficijenta apsorpcije u frekvenciji kod membranskog apsorbera s uljnim platnom: (a) — zračni jastuk od 5 cm, neprigušen; (b) — zračni jastuk od 5 cm, prigušen; (c) — zračni jastuk od 10 cm, neprigušen; (d) — zračni jastuk od 2 cm, neprigušen





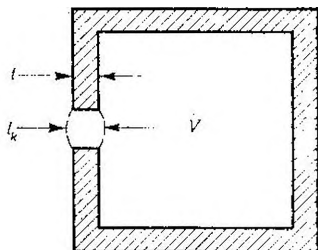
Sl. 5.28. Frekvencijska karakteristika koeficijenta apsorpcije kod trostrukoga membranskog apsorbera od uljnog platna

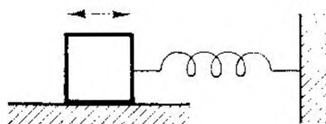
U građevinama i unutrašnjoj opremi prostorija ima mnoštvo nehotičnih membranskih apsorbera. Obješeni strop od gipsa, drvene obloge ili drveno opločenje, ormari, prozori, vrata itd., sve su to apsorberi koji povoljno djeluju na niskim frekvencijama jer smanjuju vrijeme odjeka. Poznat je neugodan osjećaj u podrumima, kupaonicama i sličnim prostorijama gdje apsorbera membranskog tipa nema, pa je vrijeme odjeka u niskom frekvencijskom području vrlo dugo.

5.3. REZONATORSKI APSORBERI

Za rezonatorske apsorbere upotrebljavaju se akustički *(Helmholtzovi)* rezonatori. To su kutije ili posude s otvorom, kojima zrak u otvoru, grlu, predstavlja masu koja pod djelovanjem zvučnog tlaka titra, a volumen zraka u samoj kutiji, ili posudi, služi kao opruga (sl. 5.29). Najveća se apsorpcija postiže na rezonantnoj frekvenciji. Ona se može približno izračunati po formuli:

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{l_k \cdot V}} \tag{5.3}$$





Sl. 5.29. Akustički rezonator i analogni mehanički rezonator

Tu je S presjek grla, c brzina širenja zvuka u zraku, V volumen kutije ili posude a l_k je korigirana duljina. Kako, naime, u titranju ne sudjeluje samo zrak koji je točno u grlu nego dijelom i onaj izvan tog otvora, efektivna je duljina grla veća. Ako duljinu grla označimo sa l, i ako je grlo kružnog presjeka i polumjera R, efektivna njezina vrijednost bit će:

$$l_k = l + 1{,}57\,R$$

Formula (5.3) daje dovoljno točan rezultat uz uvjet da je valna duljina na rezonantnoj frekvenciji velika u odnosu prema svim trima dimenzijama kutije i da je grlo u usporedbi s kutijom maleno.

Prigušivanje će nastati dijelom zbog reradijacije zvučne energije, djelomično zbog trenja čestica zraka o stijenke grla, ali će utjecati i umjetno prigušenje koje se poduzima da bi se dobila željena vrijednost. Hotimično prigušivanje postiže se umećući porozan materijal u kutiju ili stavljajući mrežast materijal preko grla.

Akustički se rezonatori upotrebljavaju bilo kao *pojedinačni rezonatori*, razmješteni daleko jedan od drugoga da ne bi međusobno djelovali, bilo kao *spojeni rezonatorski sistemi*, ili, konačno, kao *rezonatori s rasporom*, tj. takvi kojima je jedna dimenzija mnogo veća od valne duljine na rezonantnoj frekvenciji.

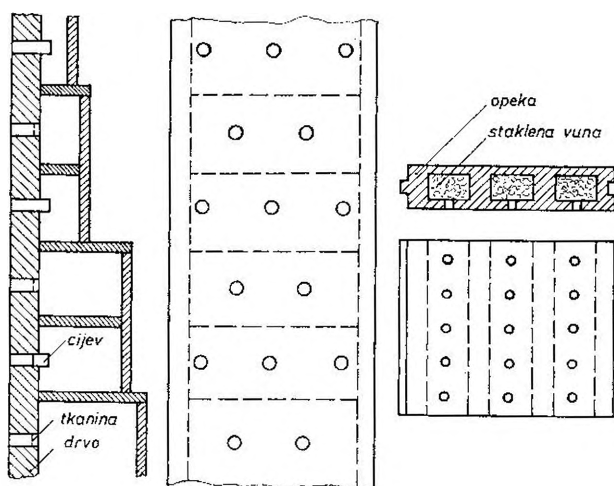
5.3.1. Pojedinačni rezonatori

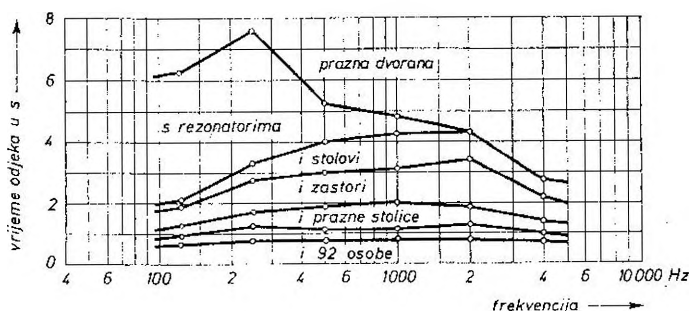
Oni moraju biti izrađeni od čvrsta materijala, npr. betona, kako bi prilikom titranja gubici u stijenama bili što manji. Da se dobije velika apsorpcija, otpor trenja treba da je malen. Obično se ovim rezonatorima u kutiju ne stavlja ni porozni

materijal ni mrežasti materijal preko grla. Maksimalan broj apsorpcijskih jedinica A_r na rezonantnoj frekvenciji ovisi o rezonantnoj frekvenciji i iznosi:

$$A_r = \frac{\lambda_r^2}{2\pi} \qquad (5.4)$$

Pri tome je λ_r valna duljina u metrima, a A_r su Sabineovi kvadratni metri. Ova se apsorpcija postiže uz optimalan otpor trenja. Kao što iz formule izlazi, rezonatori ovog tipa mogu uspješno poslužiti samo na frekvencijama otprilike do 300 Hz. Prigušivanje zvučnih valova na uskom pojasu ovako niskih frekvencija dolazi u obzir npr. u velikim koncertnim dvoranama, gdje vrijeme odjeka na rezonantnim frekvencijama prostorije može da bude i nekoliko puta veće nego na ostalim frekvencijama.



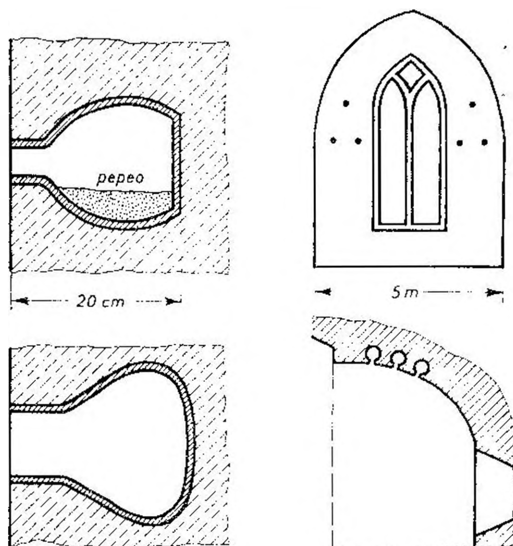


Sl. 5.30. Gore: primjeri izvedbi pojedinačnih rezonatora. Dolje: utjecaj postupno unošenih različitih apsorbera na frekvencijsku karakteristiku vremena odjeka u jednoj dvorani

Da bi se efikasno smanjivalo vrijeme odjeka na širem pojasu najnižih frekvencija, upotrebljava se niz rezonatora ugođenih na različite frekvencije unutar pojasa. Sl. 5.30. sadrži izvedbu takvih rezonatora i frekvencijsku karakteristiku vremena odjeka bez rezonatora, te uz njihovo djelovanje.

Pojedinačni rezonatori mogu se uspješno upotrijebiti i za prigušivanje buke koju na pojedinačnim vrlo niskim frekvencijama stvara neki stroj.

U srednjovjekovnim skandinavskim crkvama (i u nekim starim crkvama u Srbiji) upotrebljeni su pojedinačni rezonatori. To su posude ugrađene u zid, katkad radi prigušivanja djelomično ispunjene pepelom (sl. 5.31).



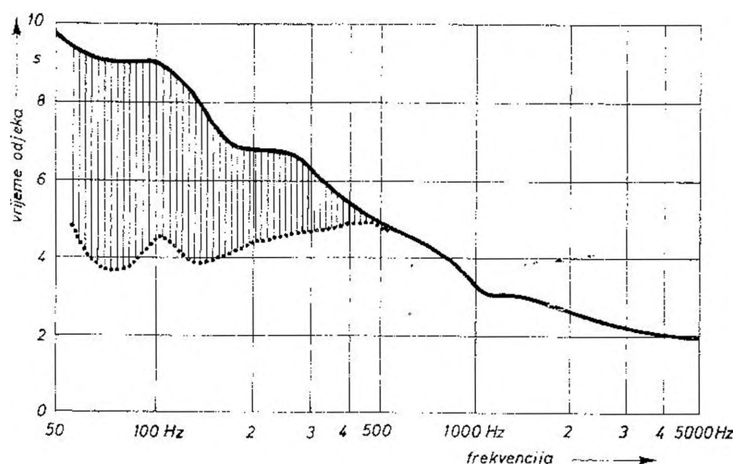
Sl. 5.31. Rezonatori ugrađeni u zidove nekih starih danskih i švedskih crkvi

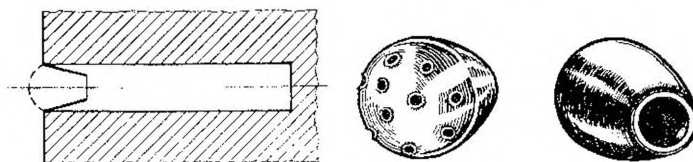
Posebnu pažnju zaslužuju rezonatori u srednjovjekovnoj crkvi u mjestu Pleterje, 15 km istočno od Novog Mesta u Sloveniji. U toj crkvi dvostruki rezonatorski sistemi sastoje se, kao što prikazuje sl. 5.32, od posuda i rupa u zidu. Na strani okrenutoj prostoriji posuda ima rupe, a druga je strana potpuno otvorena. Takav dvostruki rezonator ima veliku apsorpciju u frekvencijskom području od 80 do 250 Hz. Na osnovi volumena prostorije, procijenjenog koeficijenta apsorpcije ploha, te oblika i smještaja zvučnih posuda stručnjaci tvrtke *Brüel i Kjaer* proračunali su vrijeme odjeka kad su prisutni rezonatori i kad ih nema. Rezultat je na dijagramu, sl. 5.32. Kao što se zapaža, rezonatorima se vrlo mnogo smanjuje vrijeme odjeka na niskim frekvencijama.

O zanimljivoj upotrebi rezonatora piše *Vitruvius* u knjizi *De Architectura.* U starim grčkim i rimskim kazalištima bile su ispod sjedala smještene vaze od bronce otvorima okrenute prema orkestru. Vaze su bile ugođene na tonove glazbala. Prema Vitruviusu, svrha vaza bila je „da pojačaju i poljepšaju zvuk". Danas se zna da su ti rezonatori bili postavljeni da bi proizvodili umjetni odjek (0,5—2 s). Kad je instrument prestao svirati ili pjevač pjevati, pobuđeni rezonator još je kratko vrijeme emitirao zvuk, čime je donekle nadoknađivao ono čega otvoren prostor nema*.

---

*Istitravanje rezonatora čuje se samo u njegovoj neposrednoj blizini, do udaljenosti r za koju vrijedi: $r = 54/f_r$ (m). Na primjer, za rezonantnu frekvenciju od 100 Hz ta je udaljenost oko pola metra (formula vrijedi uz uvjet da je otpor trenja u rezonatoru jednak otporu zračenja).





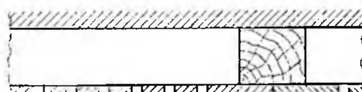
Sl. 5.32. Smanjenje vremena odjeka pomoću dvostrukih rezonatora u staroj samostanskoj crkvi u Pleterju (SR Slovenija)

5.3.2. Spojeni rezonatorski sistemi ili panelni rezonatori

Panelni rezonatori grade se tako da se čvrsta tanka panelna ploča s izbušenim okruglim ili duguljastim rupama učvrsti na stanovitoj udaljenosti od zida (sl. 5.33). Ako su rupe okrugle, obično im je promjer 3—5 mm, a međusobni razmak 10—15 mm. Rezonantnu frekvenciju takvoga sistema određuje pojedini otvor kao grlo rezonatora s „pripadnim" volumenom iza ploče. Taj se volumen dobiva tako da se cijeli volumen prostora iza ploče podijeli brojem rupa. Rezonantna frekvencija može se izračunati po formuli :

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{P\%}{100 \cdot h \cdot l}} \qquad (5.5)$$

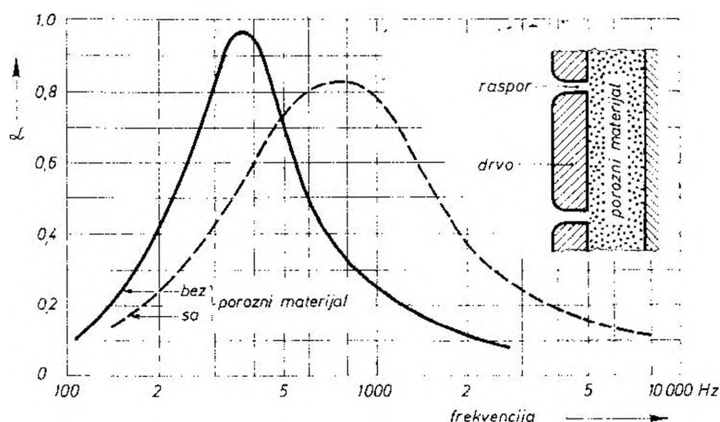
Sl. 5.33. Presjek panelnog rezonatora



Pri tome je P postotak perforacije, tj. odnos između površine rupa prema površini ploče pomnožen sa 100, l je efektivna duljina grla, za koju vrijedi: $l = b + 0{,}8\,d$, gdje je b debljina ploče, a d promjer rupa. h je udaljenost ploče od zida, a c je brzina širenja zvuka.

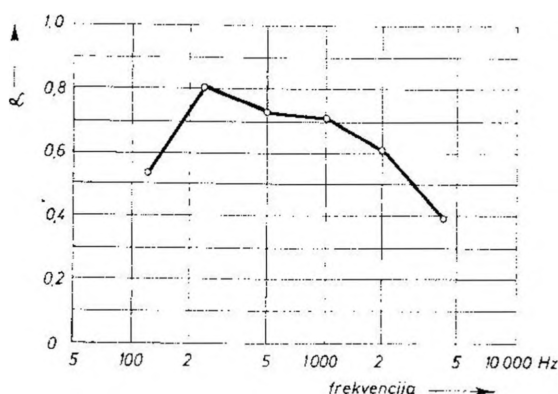
Prigušivanje spojenih rezonatorskih sistema, suprotno pojedinačnim rezonatorima, mora biti veliko. To se može postići na tri načina: stavljajući porozan materijal u prostor iza ploče, prekrivajući otvor vrlo poroznim materijalom, ili tako da se rupe izvedu malog promjera.

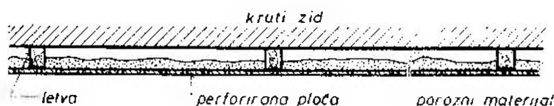
Pregrade iza ploče nisu potrebne. Ako se u taj prostor ne stavi porozni materijal, a žele se staviti pregrade, razmak između njih treba da je manji od četvrtine valne duljine na rezonantnoj frekvenciji. Uz porozni materijal iza ploče razmak između pregrada određuje potrebna mehanička čvrstoća.



Sl. 5.34. Frekvencijska karakteristika koeficijenta apsorpcije panelnoga rezonatorskog apsorbera s prigušnim materijalom i bez njega

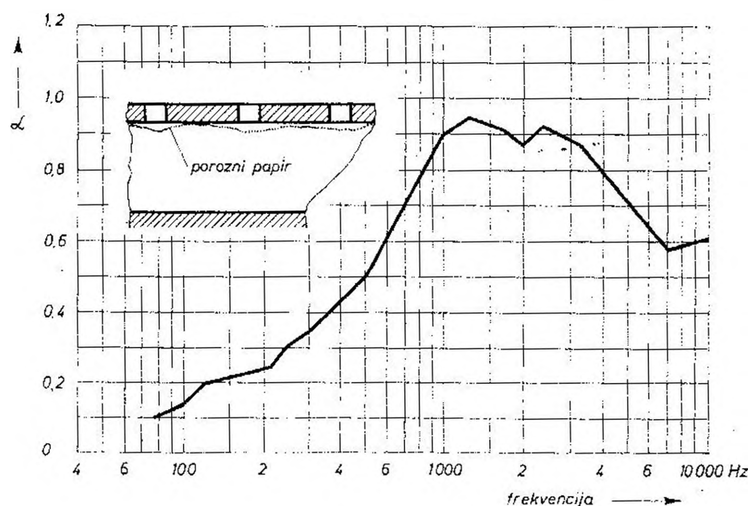
Na sl. 5.34. dijagram je koeficijenta apsorpcije jednoga panelnog rezonatora s duguljastim rupama. Razmak između ploče i zida je 5 cm. Puna krivulja odnosi se na rezonator bez porozna materijala, a crtkana na onaj koji je njime ispunjen. Doda li se taj materijal, koeficijent apsorpcije se smanji i krivulja je šira. I rezonantna se frekvencija pomakne naviše jer se efektivni volumen smanji. Poroznim se materijalom ne mora ispuniti cijeli volumen rezonatora. Ispuni li se on djelomično, valja porozni materijal prisloniti na rupe jer je na njihovu izlazu titrajna brzina zračnih čestica najveća. Sl. 5.35. prikazuje frekvencijsku karakteristiku koeficijenta apsorpcije u jednom takvom primjeru.





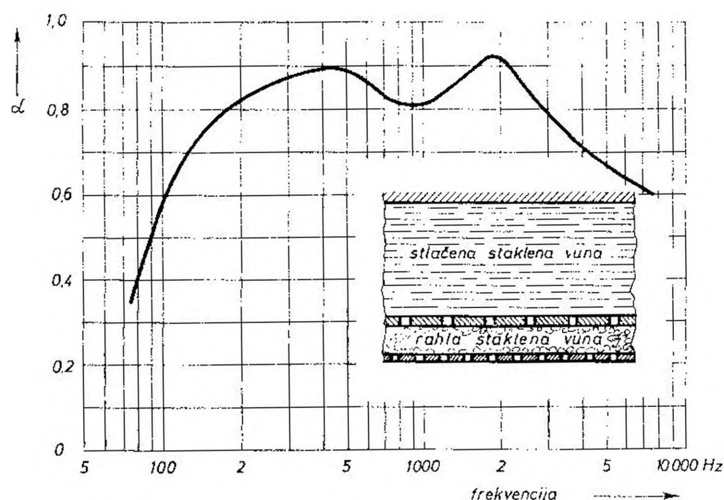
Sl. 5.35. Panelni rezonator s visokim koeficijentom apsorpcije

Visok koeficijent apsorpcije postiže se i pomoću jeftinijeg materijala nego što je porozni u debelom sloju. Na sl. 5.36. vidi se kakvu apsorpciju daje panelni rezonator s poroznim papirom iza rupa.



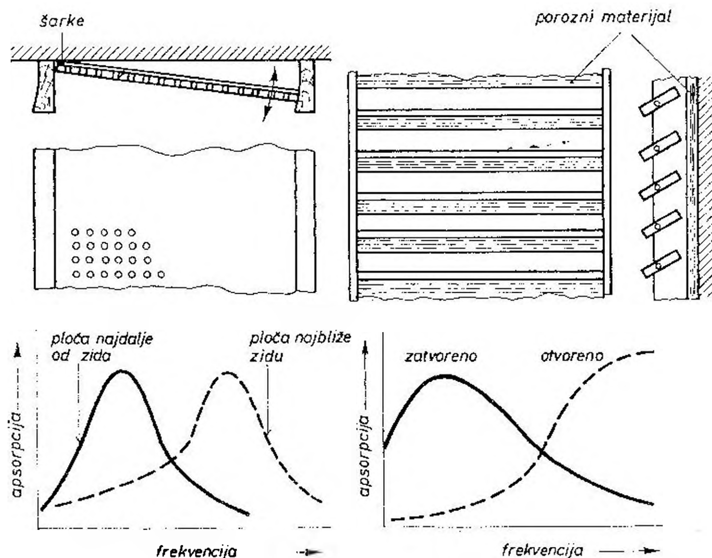
Sl. 5.36. Panelni rezonator prigušen samo poroznim papirom nalijepljenim izravno na stražnju stranu ploče, i frekvencijska karakteristika njegova koeficijenta apsorpcije

Panelni rezonatori s jednom pločom imaju najveću apsorpciju na jednoj frekvenciji. Stavljajući dva sistema izravno jedan na drugi, kao na sl. 5.37, dobivaju se dvije rezonantne frekvencije i mnogo širi pojas frekvencija na kojima je koeficijent apsorpcije velik.

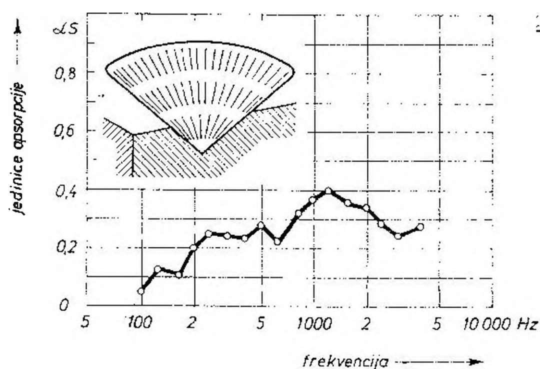


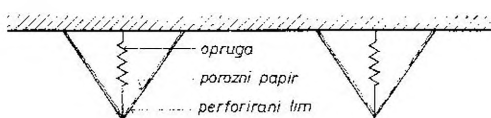
Sl. 5.37. Frekvencijska karakteristika koeficijenta apsorpcije dvostrukoga panelnog rezonatora ispunjenoga poroznim apsorpcijskim materijalom

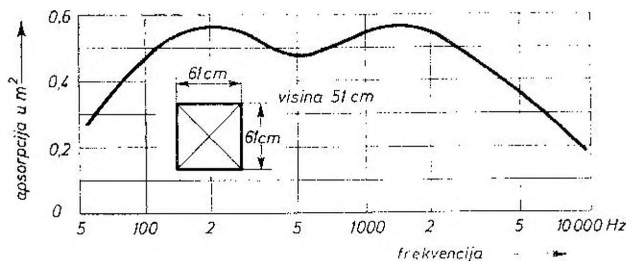
Sl. 5.38. predočuje dvije konstrukcije u kojima se rezonantna frekvencija može pomicanjem ploče mijenjati. Dijagrami prikazuju frekvencijske karakteristike koeficijenta apsorpcije za krajnje položaje ploča.



Sl. 5.38. Panelni rezonatori s promjenljivom apsorpcijom







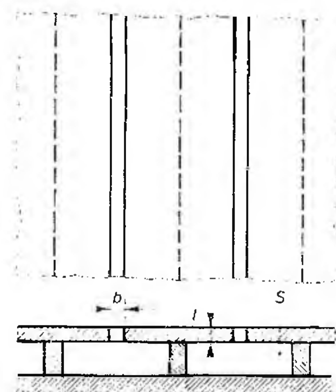
Sl. 5.39. Ovjesni panelni rezonatori, njihova konstrukcija i frekvencijska karakteristika apsorpcije

Slično visećim poroznim apsorberima mogu se i panelni apsorberi izvesti takva oblika da im je koeficijent apsorpcije veći od jedan*. To su piramide ili čunjevi građeni od ljepenke, šperploče, lesonita ili lima, osnovicom pričvršćeni o strop. Iza rupa se, zbog jeftinoće, obično stavlja porozni papir. Na sl. 5.39. karakteristika je koeficijenta apsorpcije za čunjasti i piramidni apsorber. Takvim apsorberima valja pokriti jednu šestinu do jednu trećinu stropa. Prednost im je što su jeftini, lako se postavljaju i lako uklanjanju.

5.3.3. Rezonatori s rasporom

Ovoj vrsti rezonatora, suprotno onima koje smo dosad razmatrali, jedna je dimenzija mnogo veća od valne duljine na rezonantnoj frekvenciji (sl. 5.40). Prednost im je u tome što su jednostavne konstrukcije i može im se dati lijep vanjski izgled. Rezonantna se frekvencija izračunava po formuli:

$$f_r = \frac{c}{2\pi}\sqrt{\frac{b}{\left[l + \frac{2b}{\pi}\left(1{,}12 + \ln\frac{c}{\pi\, b\, f_r}\right)\right] S}} \qquad (5.6)$$



Sl. 5.40. Konstrukcija rezonatora s rasporom

Tu je c brzina širenja zvuka, b širina raspora, l dubina raspora (debljina panelne ploče), a S je presjek rezonatora u ravnini okomitoj na raspor**.

Rezonatori s rasporom se, kao i oni obični, mogu upotrebljavati i pojedinačno (individualni rezonatori s rasporom). Maksimalan je broj apsorpcijskih jedinica koji se može postići ovisi o rezonantnoj frekvenciji:

$$A_r = \frac{\lambda_r}{\pi}\, m^2 \text{ Sabineovih ili sabina po metru u smjeru raspora}$$

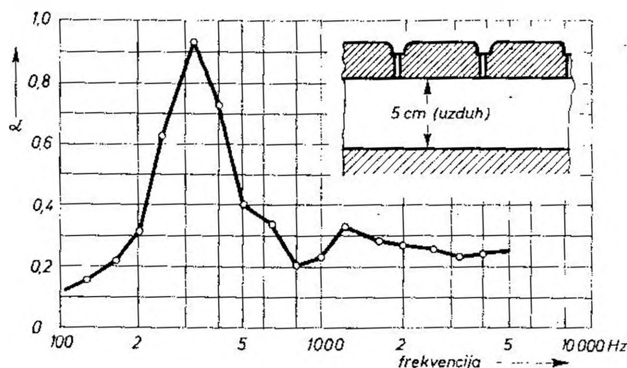
Pri tome je λ_r valna duljina u metrima na rezonantnoj frekvenciji.

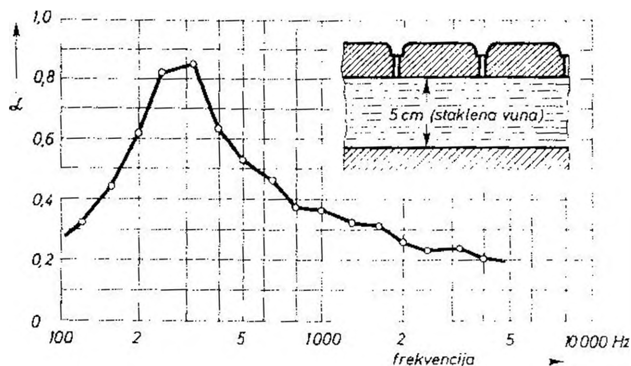
* Prema definiciji koeficijent apsorpcije može imati najveću vrijednost jedan. Viseći apsorberi imaju zbog ogiba povećanu apsorpciju. Ona se može izraziti kao umnožak stvarnog koeficijenta apsorpcije i povećane površine ili, obratno, kao umnožak stvarne površine i povećanog koeficijenta apsorpcije. Iz praktičkih razloga uobičajeno je ovo drugo.

** Iz formule se vidi da rezonantna frekvencija ponešto ovisi o odnosu valne duljine (c/f_r), prema širini raspora, zbog čega se f_r nalazi implicitno u izrazu (5.6).

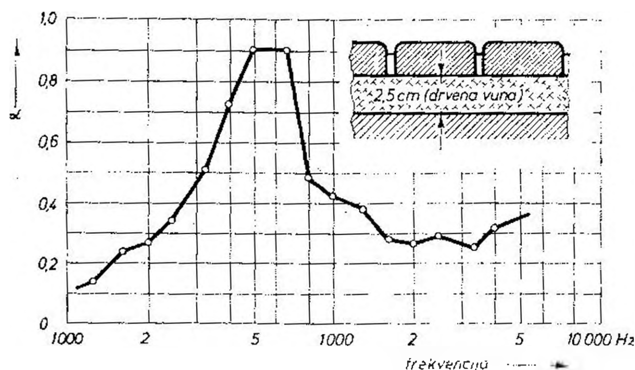
Češće nego pojedinačni upotrebljavaju se panelni rezonatori s rasporom. Na sl. 5.41. frekvencijske su karakteristike koeficijenta apsorpcije takva rezonatora, bez ispune u rezonatorskom prostoru i s ispunom od staklene vune. Kao što se vidi, karakteristika je apsorpcije bez ispune selektivnija. Na sl. 5.42. karakteristika je rezonatora kojem su raspori dvostruko širi, a dubina je prostora manja. Kod rezonatora na sl. 5.43. prigušivanje je postignuto naboranom ljepenkom.

Prednje letvice panelna rezonatora s rasporom mogu se i tako oblikovati da se ne vidi apsorpcijski materijal (sl. 5.44).

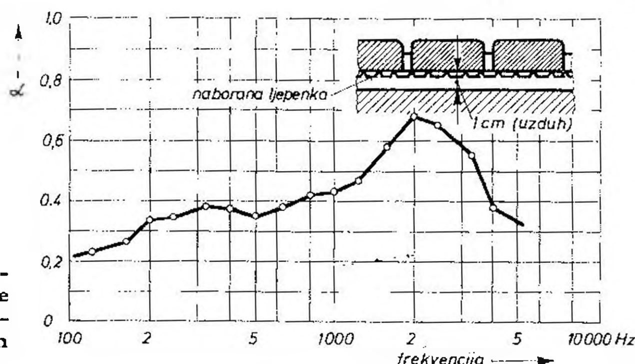




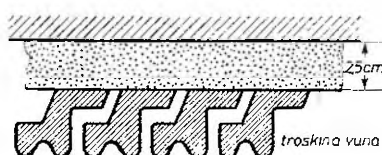
Sl. 5.41. Frekvencijska karakteristika koeficijenta apsorpcije panelnog rezonatora s rasporima – gore bez ispune, dolje s ispunjenim rezonatorskim prostorom



Sl. 5.42. Ovisnost koeficijenta apsorpcije o frekvenciji za panelni rezonator s rasporima koji je sličan onome na sl. 5.41. dolje, samo ima šire raspore i manju udaljenost ploče od zida



Sl. 5.43. Frekvencijska karakteristika koeficijenta apsorpcije panelnog rezonatora s rasporima i prigušenjem nabranom ljepenkom



Sl. 5.44. Izvedba panelnog rezonatora s rasporima u kojoj se apsorpcijski materijal izvana ne vidi

5.4. AKUSTIČKE MJERNE PROSTORIJE

5.4.1. Gluha komora

U svim tehničkim mjerenjima, a prema tome i u akustičkima, valja osigurati ponovljivost rezultata. Da bi se taj uvjet zadovoljio, u akustičkim mjerenjima mora postojati mogućnost da se definira zvučno polje. U prostorijama kojima su zidovi od konvencionalnih materijala ne može se zvučno polje jednostavno definirati. Jednaka mjerenja u različitim prostorijama ne daju jednake rezultate. To vrijedi čak i za istu prostoriju ako se mjeri na različitim mjestima.

U akustičkom smislu najjednostavnije se može definirati *otvoren prostor*. U njemu nema u neposrednoj blizini ploha od kojih bi se zvučni valovi reflektirali. Osnovna zakonitost otvorena prostora sadržana je u izrazu $1/r$, što znači da uz *točkasti izvor zvuka zvučni tlak opada obrnuto razmjerno udaljenosti od izvora.* Međutim, u otvorenu prostoru nije moguće mjeriti u svako vrijeme jer često smetaju padavine (kiša, snijeg) i buka, bilo tehnička (od prometnih sredstava), bilo prirodna (govor, vjetar, grmljavina). Kao jedino rješenje ostaje zatvoren prostor koji bi imao osobine otvorena prostora.

Da bi se zakonitost opadanja zvučnog tlaka, sadržana u izrazu $1/r$, osigurala u zatvorenu prostoru, moraju se zidovi prostorije obložiti debelim slojem apsorpcijskog materijala koji praktički sasvim onemogućuje refleksije zvučnih valova. Kad u takvu prostoriju čovjek uđe iz poluodječne prostorije, čini mu se kao da slabije čuje, pa joj odatle naziv *gluha komora.*

U gluhoj komori izvode se:

1. mjerenja mikrofona i zvučnika;
2. mjerenja buke transformatora i motora, ili općenito aparata;
3. audiološka mjerenja pri istraživanju osobina sluha;
4. mjerenja osobina govora pri fonetičkim istraživanjima;
5. biološka mjerenja na životinjama.

Općenito, gluha komora mora biti dovoljno velika kako bi se i na najnižim frekvencijama mogao postići ravni val. Osnovni razlog zbog kojeg se gluha komora smanjuje što je više moguće jest cijena.

Mjerno frekvencijsko područje gluhe komore određeno je njezinom *graničnom frekvencijom*. Tako se naziva ona niska frekvencija na kojoj koeficijent apsorpcije padne na vrijednost 0,99, odnosno na kojoj koeficijent refleksije poraste na 0,1.

Postoje vrlo male gluhe komore, kao one pomoću kojih se mjere karakteristike slušnih aparata za nagluhe. Tu zadovoljava i mali volumen zato što je potrebna donja granična frekvencija relativno visoka, i što se na točnost mjerenja ne postavljaju veliki zahtjevi. U vrlo velikim, prema tome i vrlo skupim gluhim komorama mjeri se buka velikih transformatora i motora. Za takva mjerenja mora granična frekvencija gluhe komore biti vrlo niska, što zbog debeloga apsorpcijskog sloja znatno povećava dimenzije prostorije za gluhu komoru.

Granična frekvencija ovisi o materijalu kojim su obložene stijene i o odnosu između dimenzija komore i valne duljine. Iz teorije o provođenju zvuka kroz jako prigušene kanale izlazi da za nesmetano provođenje zvuka mora biti ispunjen uvjet:

$$\frac{h}{\lambda} > \frac{Z}{1{,}2\,\rho\, c} \tag{5.8}$$

Tu je h širina kanala, λ valna duljina, a Z je akustička impedancija prigušnih stijena. Iz te relacije izlazi da npr. za graničnu frekvenciju od 50 Hz širina kanala h mora biti veća od 6 m.

Za omjer gustoće energije zvuka koja potječe od reflektiranog zvuka (E_r) i gustoće energije izravnog zvuka (E_d) u nekoj točki prostorije vrijedi:

$$\frac{E_r}{E_d} = \frac{16\,\pi\, r^2\,(1 - \alpha_n)}{S_n\,\alpha_n} \tag{5.9}$$

Pri tome je r udaljenost točke od izvora zvuka, S_n je ukupna površina prostorije a α_n je prosječni koeficijent apsorpcije materijala kojim je prostorija obložena. Omjer E_r/E_d smanjuje se to više što je:

— veća prostorija jer se time povećava S_n;
— udaljenost r manja jer se time smanjuje udio reflektiranog zvuka;
— koeficijent apsorpcije veći, s krajnjom vrijednošću $\alpha_n = 1$.

Apsorpcijska moć obloge u gluhoj komori ovisi ne samo o debljini sloja nego i o poroznosti materijala i o njegovu otporu strujanju. Općenito, uzrok je refleksiji zvuka razlika između impedancije zraka i impedancije stijene. Od apsorbera se zahtijeva da osigura postupan prijelaz od impedancije zraka na impedanciju stijene.

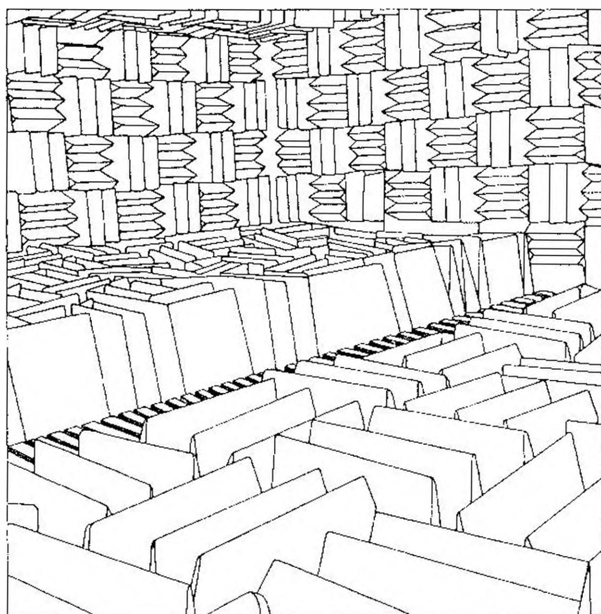
Za koeficijent refleksije vrijedi:

$$r = \sqrt{1 - \alpha} \tag{5.9}$$

Prema tome, uz koeficijente apsorpcije 0,96, 0,99 i 0,999 1 dobivaju se koeficijenti refleksije 0,2, 0,1 i 0,03.

Granična frekvencija, odnosno granična valna duljina, može se približno izračunati iz podatka o debljini apsorpcijskog sloja. Označimo li debljinu sloja sa *d*, granična frekvencija se odnosi na valnu duljinu 4*d*. Tako, treba li da granična frekvencija bude oko 40 Hz, što odgovara valnoj duljini od približno 8 m, debljina sloja mora biti oko 2 m. Uz niske granične frekvencije velik dio prostora komore zauzima, dakle, apsorpcijski materijal.

U prvo vrijeme gradnje gluhih komora obloge su se izrađivale od debeloga homogenog sloja pamuka, vate ili sličnog materijala. Nakon toga pojavile su se konstrukcije od tekstilnih zastora postavljenih na međusobno različitim udaljenostima blizu stijene. Godine 1939. pojavljuje se konstrukcija klinasta oblika. To su zapravo bile žičane piramide presvučene muslinom i ispunjene kamenom ili staklenom vunom. Vršci piramida bili su usmjereni prema mjernom prostoru okomito na stijenu (sl. 5.45). Prednost takvih konstrukcija pred homogenim slojem bila je u tome što se apsorpcija jednoliko povećavala u smjeru prema stijeni i što su imale dobre osobine za kosi upad zvuka.

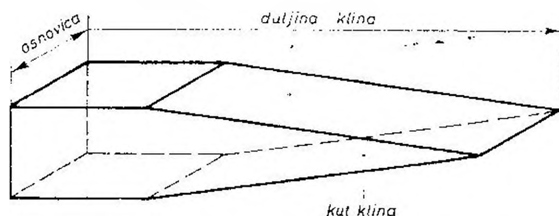


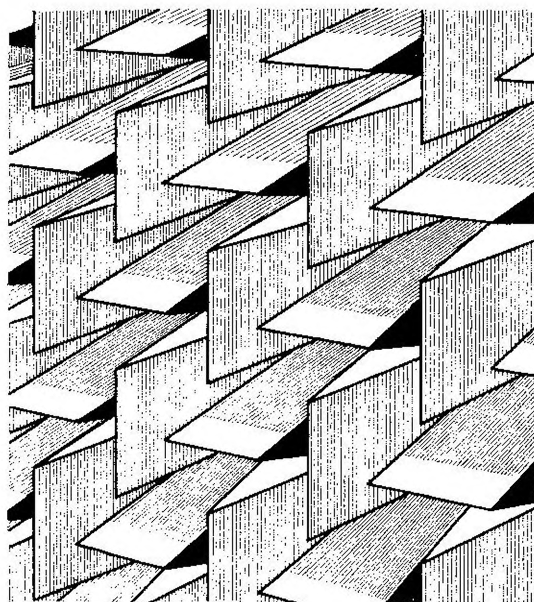
Sl. 5.45. Pogled u gluhu komoru obloženu prizmatičnim apsorpcijskim klinovima

Danas se općenito za gradnju gluhih komora upotrebljavaju apsorpcijski klinovi četverostrane prizmatične osnovice s klinovitim nastavkom u obliku izdužene trostrane prizme (sl. 5.46). Paraboličan presjek klina bio bi bolji od trokutnoga, ali teškoće pri rezanju i veći utrošak materijala ne bi opravdavali takav rez, to više ako poboljšanje ne bi imalo veće značenje.

Iznijet ćemo rezultate istraživanja i mjerenja koji su primjenom cijevne metode dobiveni na klinovima, a pri tome su promjenljivi faktori bili:

— različiti kutovi klinova;
— razne duljine klinova;
— različite duljine osnovica klinova;
— postavljanje rezonatora iza klinova;
— razni materijali klinova.





Sl. 5.46. Gore: oblik apsorpcijskog klina od poliuretan-etera kakav se upotrebljava za oblaganje stijena, stropa i poda u gluhim komorama. Dolje: pogled na dio stijene gluhe komore obložene klinovima

Granična se frekvencija uz različite kutove klinova mjerila pri konstantnoj duljini i širini klinova, a mijenjali su se kut i visina osnovice. Najpovoljniji rezultati dobiveni su uz kutove od 13° do 17°.

Mjerenja donje granične frekvencije uz klinove različite duljine potvrdila su već spomenutu tvrdnju da je granična frekvencija obrnuto razmjerna debljini obloge, tj. duljini klinova.

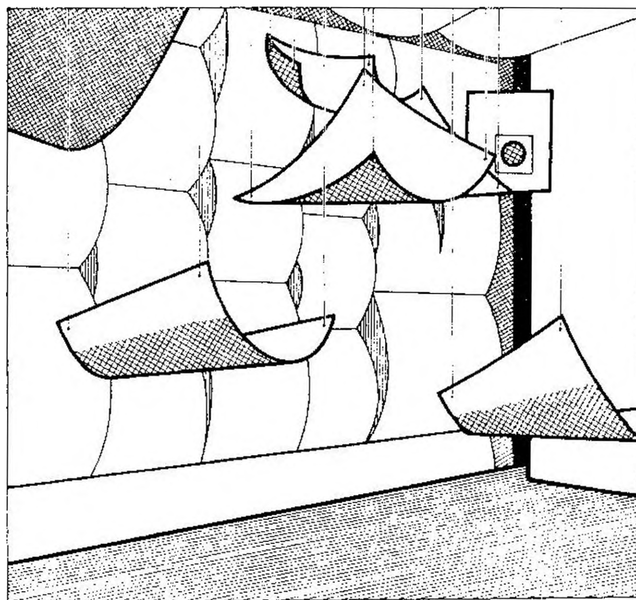
Mjerenja uz raznu duljinu osnovice otkrila su da za pojedinu duljinu klinova postoji optimalna duljina osnovice uz koju je granična frekvencija najniža.

Rezonatori postavljeni iza klinova i frekvencijski ugođeni niže od granične frekvencije samih klinova nisu dali rezultate koji bi opravdali njihovu upotrebu.

Mjerenja granične frekvencije koja se dobiva pomoću klinova od različita materijala — staklene, kamene ili mineralne vune i poliuretan-etera — i različite težine po kubičnom metru, dala su rezultate koji upućuju na to da je najpovoljnija izvedba s klinovima od mineralne vune (silana) specifične gustoće od 120 kg/m³.

5.4.2. Odječna komora

Za akustičke mjerne svrhe služi i komora kojoj su osobine upravo suprotne onima što ih ima gluha komora. U takvoj je komori koeficijent apsorpcije zidnih ploha tako malen da vrijeme odjeka na srednjim frekvencijama iznosi 5 s i više, iako volumen najčešće ne premašuje 200 m³. Zbog mnogobrojnih refleksija nastaje u komori difuzno polje kojemu je osnovna karakteristika u tome što je zvučni tlak, proizveden nekim izvorom, jednak na svim mjestima u komori (osim u neposrednoj blizini stijena i izvora). Prema tome, u *odječnoj komori* razina se snage zvuka može odrediti jednim jedinim mjerenjem zvučnog tlaka, uz poznati volumen i vrijeme odjeka koji su konstante za tu komoru. Da bi se povećala difuznost zvuka, često se u komoru stavljaju savijene ploče od pleksi-stakla (sl. 5.47). Problem difuznosti na niskim frekvencijama rješava se tako da se komora gradi s neparalelnim stijenama, što se odnosi i na strop i pod.



Sl. 5.47. Pogled u odječnu komoru. Na stijene i u prostoru postavljeni su difuzori

Odječna se komora može upotrijebiti za ove svrhe:

1. mjerenja i ispitivanja zvučnika;
2. mjerenja i ispitivanja mikrofona;
3. mjerenja koeficijenta apsorpcije akustičkih materijala;

4. mjerenje akustičke izolacijske moći građevinskih konstrukcija;
5. slušne procjene razlike u razini šuma *ili* buke motora i aparata;
6. ispitivanje mehaničke čvrstoće i pouzdanosti konstrukcija pod utjecajem zvučnih valova;
7. stvaranje pomoćnog odjeka radi dodavanja u elektroakustički prijenosni kanal.

Kako bi se dobio što dulji odjek, stijene se odječne komore oblažu materijalima vrlo glatke površine, kao što su keramičke pločice, staklene ili metalne ploče itd. Isti se rezultat postiže uz specijalnu obradu cementne površine stijena. Posebnu pažnju valja obratiti zaštiti odječne komore od buke. Zbog velikog vremena odjeka vanjska se buka ne smanjuje u komori onoliko koliko npr. u studiju gdje se snima zvuk ili u gluhoj komori. Betonski zid debeo 15 cm ima na frekvenciji od 500 Hz zvučno prigušivanje od 50 dB. U gluhoj komori takvih zidova vanjska se buka smanjuje za jednak broj decibela. Uz jednaku debljinu zidova smanjenje buke će u studiju za snimanje zvuka biti manje — iznosit će 44 dB, a u odječnoj komori samo 34 dB. To je razlog da se odječne komore grade na tihim mjestima ili uz specijalne zaštitne mjere, kao višestruke zidove, smještaj pod zemljom i sl.

Na visokim frekvencijama vrijeme je odjeka u odječnoj komori određeno *molekularnom apsorpcijom*. Budući da je uz veću relativnu vlažnost molekularna apsorpcija manja, potrebno je u odječnu komoru dodavati paru da bi se relativna vlažnost održavala na vrijednosti većoj od 50%.

Vrijeme odjeka u odječnoj komori nije razmjerno volumenu. Ako bi se odječnoj komori oblika kocke volumen povećao osam puta, vrijeme bi odjeka bilo samo dva puta dulje, uz jednak koeficijent apsorpcije stijena. Odječnoj se komori vrijeme odjeka može produljiti tako da se ona ispuni nekim teškim plinom, npr. diklorodifluorometanom (freon 12). Brzina je zvuka u tom plinu gotovo tri puta manja nego u zraku, pa je toliko puta dulje vrijeme odjeka. Iz toga također izlazi da se jednako vrijeme odjeka u odječnoj komori ispunjenoj spomenutim plinom može dobiti uz znatno manji volumen. Za oblik kocke jednako bi se vrijeme odjeka dobilo u 27 puta manjem volumenu.

Oblik kocke nije povoljan za odječnu komoru jer daje jednake rezonantne frekvencije za sva tri para stijena. I za odječnu komoru može se — kao i za studije — preporučiti omjer dimenzija 1 : 2 : 3 ili 2 : 3 : 5. Spomenuta ovisnost vremena odjeka o volumenu i vrsti atmosfere u odječnoj komori koja ima oblik kocke ni uz te omjere bitno se ne mijenja.

5.5. MJERENJE KOEFICIJENTA APSORPCIJE

5.5.1. Cijevna metoda

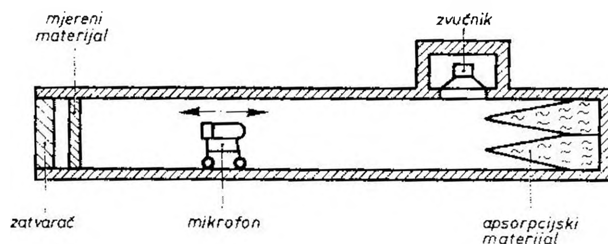
Govoreći o prirodnim frekvencijama prostorije (glava četvrta) uvodno smo opisali kako je u Kundtovoj cijevi moguće ustanoviti pojavu stojnih valova. Isti se princip upotrebljava za mjerenje koeficijenta apsorpcije. Na jedan kraj cijevi postavi se zvučnik, a na drugi mjereni apsorpcijski materijal (sl. 5.48). Mikrofonom koji se uzduž cijevi može pomicati ustanovljuje se maksimum i minimum zvučnog tlaka. Amplitudu zvučnog tlaka što ga stvara zvučnik označit ćemo sa A, a amplitudi tlaka reflektiranog vala dat ćemo oznaku B. Pri tome je B manje

od A jer je mjereni materijal djelomično apsorbirao zvuk. Maksimalni zvučni tlak dobiva se ondje gdje se obje amplitude zbrajaju. Na tim mjestima amplituda zvučnog tlaka iznosi $A + B$. Na mjestima koja su udaljena za četvrtinu valne duljine amplituda je zvučnog tlaka $A - B$. Odnos tih amplituda označit ćemo sa n:

$$n = \frac{A + B}{A - B} = \frac{p_{maks}}{p_{min}} \tag{5.11}$$

Za koeficijent apsorpcije dobivamo:

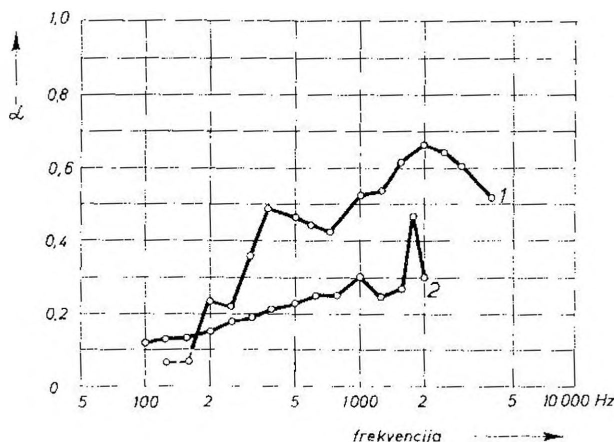
$$\alpha = 1 - r^2 = 1 - \frac{B^2}{A^2} = \frac{A^2 - B^2}{A^2} = \frac{4}{n + \frac{1}{n} + 2} \tag{5.12}$$



Sl. 5.48. Cijevni uređaj za mjerenje koeficijenta apsorpcije raznih materijala

Cijevna metoda može se primijeniti samo ako je val u cijevi ravan. To se postiže onda kad je valna duljina više nego 1,7 puta veća od promjera cijevi.

Mjerenje na principu interferencije ima svoje nedostatke. Zvučni val pada na apsorpcijski materijal *okomito*, pa koeficijent apsorpcije poprima drukčiju vrijednost nego u prostoriji gdje na materijal zvuk dolazi pod svim mogućim kutovima (sl. 5.49). Zatim, cijevnom metodom ne mogu se mjeriti membranski apsorberi jer njihov koeficijent apsorpcije ovisi o dimenzijama ploče. Zbog istih razloga ta metoda ne može poslužiti ni kad se mjere pojedinačni rezonatori ni rezonatori s rasporom.



Sl. 5.49. Frekvencijske karakteristike koeficijenata apsorpcije jednoga poroznog materijala: 1 — mjereno u odječnoj komori i 2 — mjereno cijevnom metodom

Cijev duga oko 6 m i presjeka 0,3 × 0,3 m može se upotrijebiti u frekvencijskom području od 40 do 500 Hz. Za više frekvencije upotrebljavaju se cijevi manjih dimenzija.

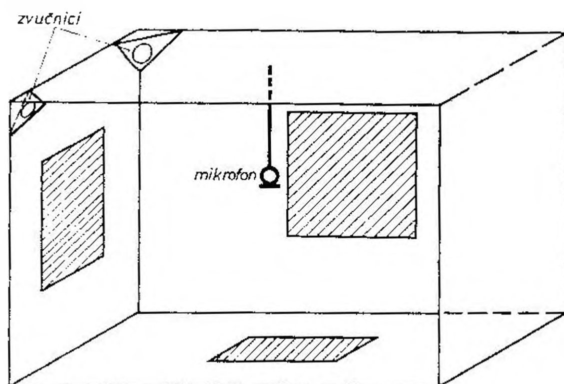
Iako ima više nedostataka, cijevna je metoda zbog svoje jednostavnosti vrlo prikladna u teorijskom radu i pri ispitivanju novih materijala.

5.5.2. Metoda odječne komore

Mjerenje metodom odječne komore daje za koeficijent apsorpcije vrijednost mnogo bližu onoj koju apsorpcijski materijal ima u normalnoj upotrebi u prostoriji. Za mjerenje se upotrebljava odječna komora volumena većega od 100 m^3. Materijal se rasporedi na tri plohe komore, kako pokazuje sl. 5.50. Površina unesenog materijala obično čini 10% ukupne površine komore. Koeficijent apsorpcije odredi se iz mjerenja vremena odjeka prazne prostorije i vremena odjeka nakon stavljanja apsorpcijskih materijala.

Vrijeme je odjeka prazne prostorije:

$$T = \frac{0{,}16V}{\alpha S} \tag{5.13}$$



Sl. 5.50. Smještanje apsorpcijskih materijala ili konstrukcija prilikom mjerenja koeficijenta apsorpcije u odječnoj komori

Pošto se stavi apsorpcijski materijal površine S_x i koeficijenta apsorpcije α_x, vrijeme odjeka je manje:

$$T_x = \frac{0{,}16\ V}{\alpha S + (\alpha_x - \alpha)\ S_x} \tag{5.14}$$

Iz ovih dviju jednadžbi dobiva se traženi koeficijent apsorpcije:

$$\alpha_x = \frac{0{,}16V}{S_x}\left(\frac{1}{T_x} - \frac{1}{T}\right) + \alpha \tag{5.15}$$

Budući da je α redovito mnogo manje od α_x, u posljednjoj se jednadžbi može izostaviti. Točnost mjerenja ovisi o razlici između vremena T_x i T. Stoga vrijeme odjeka u praznoj komori treba da je što dulje.

Količina apsorpcijskih materijala mora biti dovoljno velika kako bi velika bila i razlika između T i T_x. Prosječni koeficijent apsorpcije ne smije premašiti 0,2 jer za veće vrijednosti ne vrijedi statistička teorija odjeka.

Na rubovima ploča nastaje efekt difrakcije, što povećava apsorpciju i unosi pogrešku u mjerenje. Taj bi se „rubni efekt" mogao izbjeći tako da se pločama obloži cijela jedna stijena. No to bi bilo na štetu difuznosti zvučnog polja.

Apsorpcija se atmosfere može kad se izračunava koeficijent apsorpcije najčešće izostaviti jer je jednaka u praznoj i u obloženoj komori. Još je, k tome, efekt molekularne apsorpcije u malenim prostorijama ionako malen.

Mjereći u odječnim komorama različitih volumena dobivaju se različiti koeficijenti apsorpcije. Stoga se morala propisati veličina mjerne prostorije. Prema ISO-preporukama volumen treba da bude veći od 180 m³. Ako je on manji, komora se može upotrijebiti samo do donje granične frekvencije, koja se dobiva iz izraza:

$$f_d = \frac{700}{\sqrt[3]{V\,(\text{m}^3)}}\ (\text{Hz}) \qquad (5.16)$$

Volumen ne smije biti manji od 100 m³, što odgovara graničnoj frekvenciji od 150 Hz. Propisano je također i najniže dopušteno vrijeme odjeka:

125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
5,0 s	5,0 s	5,0 s	4,5 s	3,5 s	2,0 s

Površina ispitivanog materijala mora iznositi od 10 do 12 m². Mjerni zvuk je zavijajući ton s razmahom (devijacijom) od $\pm$ 10% i modulacijskom frekvencijom od 6 Hz. Za frekvencijsko područje iznad 500 Hz dovoljan je razmah od $\pm$ 50 Hz. Rezultati mjerenja prikazuju se tabelarno ili dijagramima, s oktavnim područjima između 125 i 4000 Hz.

Glava šesta

IZOLACIJA OD BUKE

6.1. TEHNIČKI NAPREDAK I BUKA

Industrijska revolucija koje smo svjedoci u posljednjih nekoliko desetaka godina donosi nam iz dana u dan sve veću buku. Kako se s industrijskim razvojem povećava i gustoća stanovništva, buka ugrožava sve veći broj ljudi. Zaštita čovjekova zdravlja i sluha postao je zadatak prvog reda i treba mu pokloniti posebnu pažnju.

Najviše ljudi ugrožava buka cestovnih prometnih vozila. Od nje trpe vozači, pješaci na ulicama i oni koji stanuju u blizini frekventnih prometnica. Buka, dakle, pogađa ljude svake dobi, u toku cijelog dana i noći.

Zrakoplovni promet svojom bukom ugrožava naselja u blizini aerodroma. U novije vrijeme pojavljuje se problem buke koja nastaje zbog leta aviona nadzvučnom brzinom. Udarni val što se prostire za cijelo vrijeme nadzvučnog leta može imati i rušilačku snagu.

Sve više ljudi stanuje u zgradama lagane konstrukcije. Kroz zidove sa slabijom izolacijskom moći prodire buka s ulice i iz okolnih stanova.

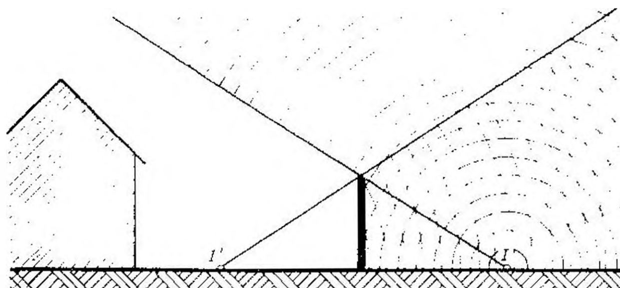
Nije rijetko da su škole sagrađene u bučnim gradskim dijelovima, bez potrebne izolacije od buke. Prometna buka koja prodire izvana i preveliko vrijeme odjeka u učionicama, otežavaju nastavnicima i učenicima da se uspješno sprazumijevaju.

Iako najčešće bukom smatramo onaj neželjeni zvuk koji čujemo, nije bez značenja frekvencijsko područje ispod čujnog spektra i iznad njega. Vozila i mnogi strojevi proizvode također infrazvučnu buku. Ako je zvučni tlak infrazvučnih frekvencija visoke vrijednosti i dulje traje, ljudi trpe od probavnih i vizualnih smetnji, vrtoglavice i mučnine. Slične pojave izazivaju i ultrazvučne frekvencije velikog zvučnog intenziteta. Sretna je okolnost u tome što zbog velike apsorpcije atmosfere ultrazvuk nema velik domet, pa su opasnosti izloženi samo radnici u blizini takva izvora. Naprotiv, infrazvučne frekvencije dopiru vrlo daleko i još se k tome od njih gotovo nemoguće izolirati.

Zvuk koji se širi kroz zrak ponajviše nastaje vibriranjem čvrstih objekata. No vrlo često se vibracije izravno prenose na čovjeka. U vozilima svih vrsta čovjek je izložen potresanju i vibracijama. Također su mnogi tvornički strojevi izvori vibracija koje se prenose na radnika. Nije rijetko da vibracije vozila ili strojeva zahvaćaju i stambene prostorije. Učinak vibracija na čovjeka ne očituje se samo u njegovu osjećaju nelagodnosti ili umora već njihovo dugotrajno djelovanje može uzrokovati organska i živčana oštećenja. Vibracije mogu biti opasne za život, ako

uzrokuju zamor materijala izazivajući lom elemenata na prometalima koja se kreću velikom brzinom ili lete.

Tehnika je svojim napretkom okružila čovjeka golemim brojem izvora buke, ali je istodobno — povećavajući radnu produktivnost — stvorila materijalna i financijska sredstva koja omogućuju uspješnu borbu protiv te nepoželjne pojave. Većinom se problem može riješiti boljom organizacijom prometa i primjenom valjanih urbanističkih principa. Spomenimo neka rješenja. Uz glatku cestovnu površinu buka je vozila manja nego ako je ona hrapava. Smanji li se brzina vožnje, buka je također manja. Budući da vozila pri polasku stvaraju veću buku, treba osigurati promet bez zastoja, što se postiže gradeći križanja jedno iznad drugoga. Ako su prometne površine izdignute iznad kuća, buka je u stanovima znatno manja nego kad su prometnice u njihovoj razini. Nasipi, usjeci i zaštitni zidovi postavljeni blizu prometnih površina uvelike zaštićuju stambene objekte od buke (sl. 6.1). To vrijedi i za raslinje, koje, doduše, ne djeluje tako efikasno, ali utječe na razinu buke. Da bi zaštitno grmlje i drveće bilo što djelotvornije, treba da bude što je moguće više i gušće te da ima što zbijenije krošnje. Najbolje rješenje u borbi protiv prometne buke — stvarala nju cestovna vozila ili ona na tračnicama — dobiva se spuštajući prometnice pod zemlju, u zatvorene tunele. No, to je i najskuplje rješenje.

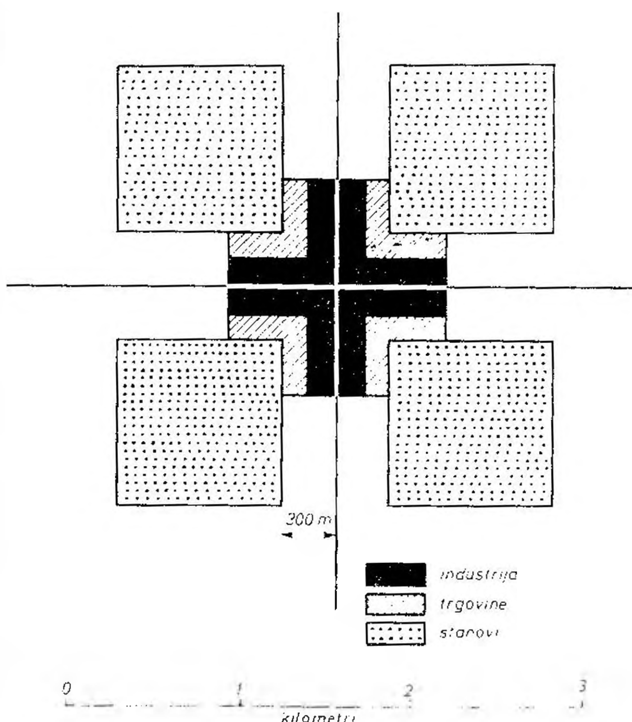


Sl. 6.1. Zid zaštićuje stanovnike stambene zgrade od buke što je proizvodi izvor I.

Buka tvorničkih pogona prodire iz zgrada kroz vrata za vozila, kroz prozore i otvore za provjetravanje, i kroz lagane krovne konstrukcije. Moderne tvorničke zgrade u kojima proizvodni strojevi i uređaji stvaraju veliku buku, nemaju prozore, već umjetnu ventilaciju i rasvjetu, a vrata su im specijalne konstrukcije i otvori su za izlazak zraka opskrbljeni prigušivačima za zvuk. Prodor tvorničke buke do naselja ne može se spriječiti zaštitnim zidovima jer njezin najveći dio dolazi iz viših dijelova zgrada, kroz krov i otvore na njemu. Jedini valjani izlaz je u tome da se urbanističkim rješenjima tvornički kompleksi smjeste u posebna područja (sl. 6.2). Pri tome je važno da se pri planiranju ispita smjer najčešćih vjetrova.

Također, u zaštiti od buke onih koji rade uz strojeve i uređaje moderna tehnika pruža više rješenja. Jedan od njih je zamjena bučnijega tehnološkog procesa manje bučnim. Tako se pneumatsko zakivanje može zamijeniti zavarivanjem, kovanje prešanjem, a čekićno izravnavanje limova valjanjem. Ako preinaka konstrukcije stroja ne daje zadovoljavajuće rješenje, ostaje još izoliranje stroja, dakle njegovo ograđivanje, kako bi se spriječilo da se buka širi. Često pomaže i povećana zvučna apsorpcija u takvim prostorijama. Kad spomenute mjere ne pomažu, ili se one ne mogu primijeniti, valja zaštititi barem sluh, zvučnim prigušivačima što se stavljaju u slušni kanal uha, ili zaštitnim šljemom koji još k tome sprečava prodor zvuka do ušiju preko kosti glave. Od vrlo bučnih tehnoloških procesa čovjek se može zaštititi i na taj način da se što više primijeni automatizacija, gdje se nadzor ostvaruje pomoću signalnih uređaja i televizijskih kamera.

Svemu što je izneseno o zaštiti od buke treba dodati da je moderna elektronika omogućila gradnju preciznih i pouzdanih instrumenata za mjerenje i analizu buke i vibracija. Iako je tehnički napredak u tome vrlo velik, instrument ipak ne može svojim pokazivanjem biti tumač onoga što čovjek doživljavajući buku čuje i osjeća. To su psihički i fiziološki činioci, posebno važni za ocjenjivanje stupnja smetnji od buke. No, unatoč tim nedostacima, bez pomoći mjerne tehnike ne bi borba protiv buke i vibracija mogla biti djelotvorna.

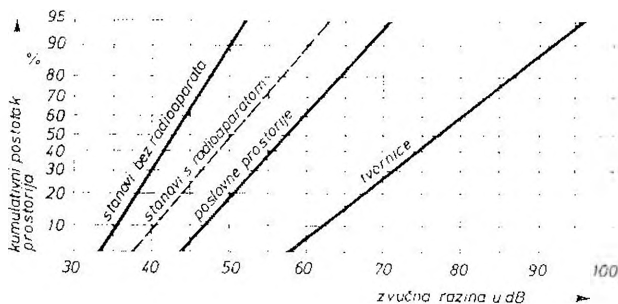


Sl. 6.2. Idealan raspored gradskih područja koji osigurava zaštitu stambenih četvrti od industrijske buke

6.2. ŠTETNO DJELOVANJE BUKE

Prema definiciji *buka je neželjen zvuk.* Govor i glazba su koristan zvuk za one koji ih žele slušati, a drugima su istodobno, pri razgovoru ili kad spavaju, štetni zvukovi ili buka*.

Karakteristike na sl. 6.3. prikazuju kako se mijenja razina buke u različitim prilikama. Buka je mjerena u prostoriji na mjestu gdje je telefon**. Na ordinati je nanesen postotak prostorija u kojima je razina buke niža od one naznačene na apscisi. Na primjer, u 90% stanova s radio-prijemnikom buka je niža od 60 fona.



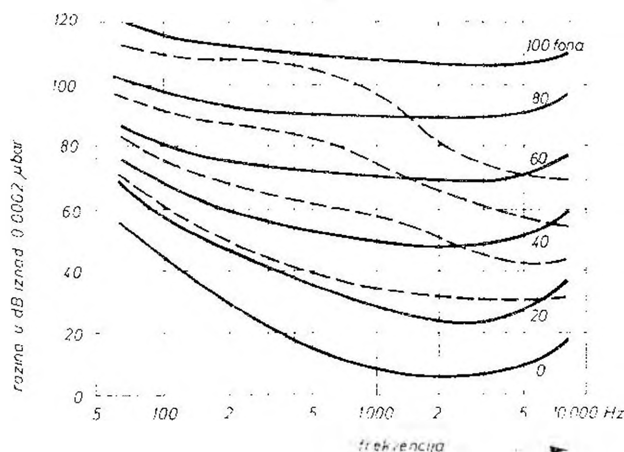
Sl. 6.3. Razina buke u različitim prostorijama mjerena na mjestu gdje je telefonski aparat

* O štetnom djelovanju buke vidi također odjeljak 2.3.6.

** Mjerenja su provedena u SAD da bi se ispitalo koliko buka smeta telefonskim razgovorima.

Jednaka razina buke nije uvijek jednaka subjektivna smetnja, tj. ne izaziva uvijek isti neugodan osjećaj. Na primjer, sviranje jedne te iste melodije može biti sasvim tiho, a ipak onome koji je čuje iz noći u noć oduzima san i postane nepodnošljivo. Naprotiv, prolazak tramvaja npr., koji proizvodi znatno veću buku, pri spavanju neće smetati.

I u samim čistim tonovima ima razlike između *glasnoće* i *stupnja podnošljivosti*. Na sl. 6.4. krivulje su jednake podnošljivosti prema *Lairdu* i *Coyeu* ucrtane preko poznatih krivulja jednake glasnoće prema *Fletcheru* i *Munsonu*. Iz krivulja se vidi da su visoki tonovi manje podnošljivi, da više smetaju nego oni niski.



Sl. 6.4. Karakteristike jednake glasnoće (pune crte) i karakteristike jednakog stupnja smetanja (crtkane linije)

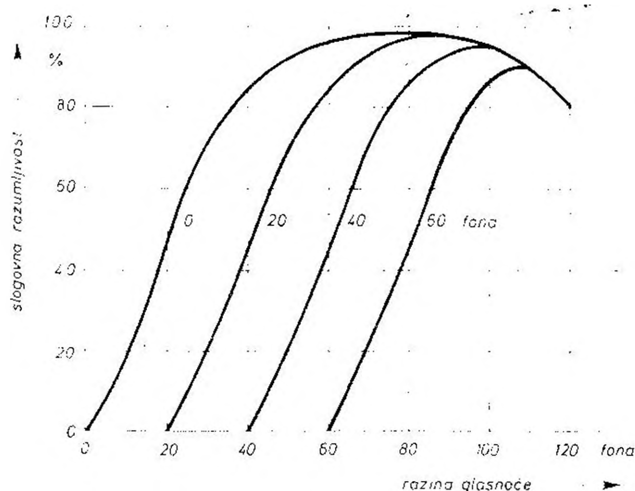
Medicinskim je istraživanjima otkriveno da buka utječe na krvni tlak, na mišićnu napetost, i na san. Ustanovljeno je da npr. prolazak automobila pokraj prozora spavaće sobe poveća krvni tlak osobe koja spava. Ta reakcija nastupa, a da se osoba ne probudi.

Izvršena su mnoga mjerenja i istraživanja da se ispita kako buka smeta pri radu. Iako se nije došlo do rezultata koji bi omogućili da se izračuna koliko treba akustičkom obradom prostorije smanjiti buku, pa da se to odrazi na efekt rada, ipak se općenito može reći da velika buka radnika umara i da mu smanjuje radni kapacitet. Na osnovi toga se ne smije zaključiti da je za rad uvijek potrebna što veća tišina. Ponekad stanovita razina buke djeluje povoljno na radni učinak.

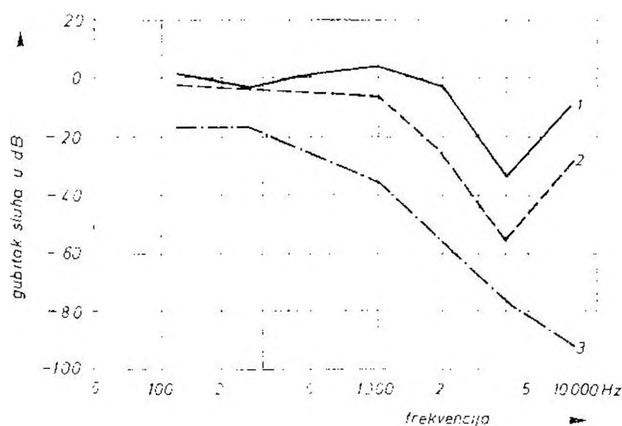
Buka pri radu najviše smeta onda kad je potrebno govorno sporazumijevanje. Razumljivost se govora smanjuje jer buka prividno povisuje prag čujnosti (vidi sl. 2.33.*b*). Promjena praga čujnosti na raznim frekvencijama ovisi o frekvencijskom spektru buke.

Na sl. 6.5. prikazana je ovisnost slogovne razumljivosti o razini glasnoće uz prisutnost buke. Tu je frekvencijski spektar buke takav da je promjena praga čujnosti konstantna u cijelome akustičkom području frekvencija.

Buka koja dulje vremena premašuje 80 — 90 fona obično izaziva djelomičan gubitak sluha. Primjere takve profesionalne nagluhosti prikazuju audiogrami na sl. 6.6. Krivulja 1 odnosi se na osobe koje su bile pri radu izložene buci relativno kratko vrijeme. Krivulje 2 i 3 prikazuju gubitak sluha osjetljivih na buku koji su dugo radili u bučnim prostorijama. Nagluhost koju predočuju krivulje 1 i 2 karakterizira povećan gubitak sluha na frekvenciji od 4000 Hz. Ako je uho izloženo

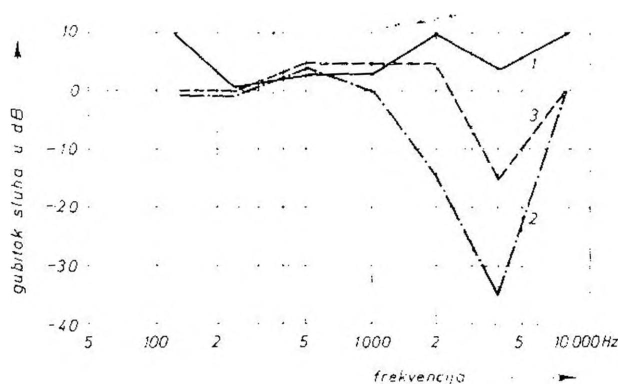


Sl. 6.5. Slogovna razumljivost ovisno o razini glasnoće u tišini i uz tri različite razine šuma



Sl. 6.6. Audiogrami tipični za tri kategorije profesionalnih nagluhosti

velikoj buci od pet do deset godina, u audiogramu nastaje znatno pogoršanje. I audiogram se osoba zdrava sluha jako mijenja ako se one iznenada izlože velikoj buci. Audiogrami 2 i 3 na sl. 6.7. snimljeni su nakon jednosatnog djelovanja buke što je proizvodi zakivanje zakovica. Krivulja 1 izražava stanje prije djelovanja buke. Krivulja 2 dobivena je nakon deset minuta, a krivulja 3 četiri sata poslije prestanka buke. Kao što se vidi, buka je ostavila posljedice koje su trajale još nekoliko sati.



Sl. 6.7. Audiogrami osobe izložene jednosatnoj buci zakivanja zakovica: 1 — prije djelovanja buke, 2 — deset minuta nakon djelovanja buke i 3 — četiri sata poslije djelovanja buke

U tablicu 6.1. uvrštene su najveće dopustive razine buke i primjerena srednja razina za različite prostorije.

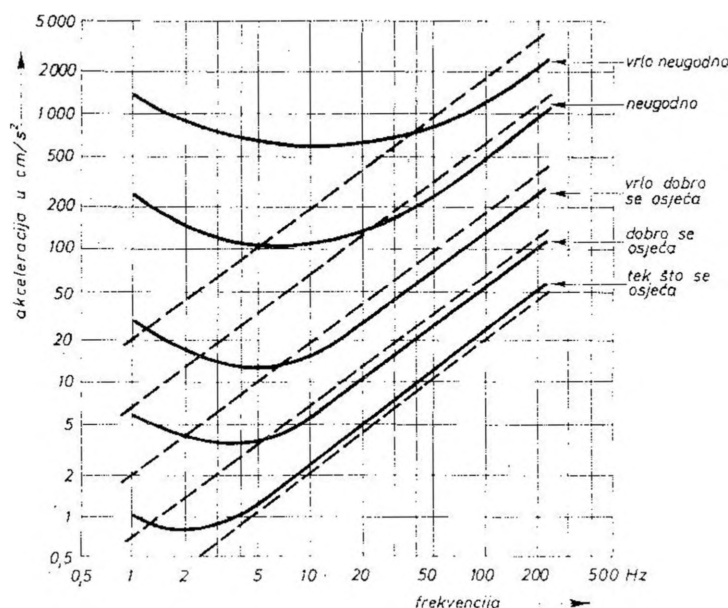
Tablica 6.1.

Vrsta prostorije	Najveća dopustiva razina u fonima	Primjerena srednja razina u fonima
Radio-studiji	15	10
Bolnice	18	12
Spavaonice	20	16
Studiji za egzaktan umni rad	35	28
Knjižnice	38	32
Učionice		
Uredi s jednom osobom	40	35
Veći uredi	55	40
Radionice za precizan rad	60	38
Običan restoran	65	55
Radionica teže industrije	90	60
Avionska kabina	95	80

6.3. OSJETLJIVOST NA POTRESANJE

Dok zvuk, odnosno buku, čovjek prima samo uhom, dakle jednim organom, dotle potresanje prima s više organa istodobno. Pri potresanju razlikujemo oscilacije, potresanje pri kojem se tijelo giba kao cjelina, i vibracije, mnogo brže potresanje, u kojem ne mora sudjelovati cijelo tijelo, ali je ono podvrgnuto nejednakim i neujednačenim pomacima. U praksi se potresanje obično sastoji od istodobnih oscilacija i vibracija. Njihanje broda na moru primjer je gdje su prisutne samo oscilacije a potresanje zgrade zbog prolaska vozila sadrži samo vibracije.

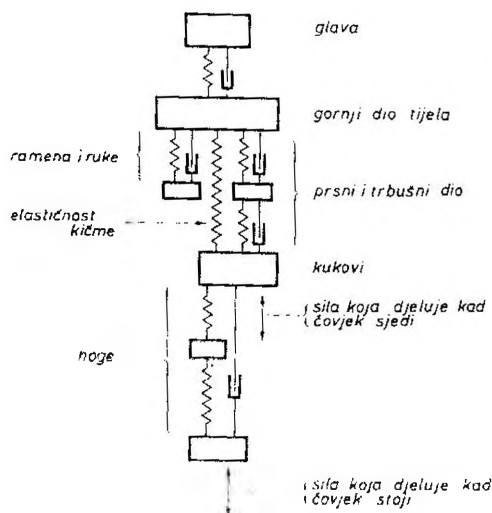
Na frekvencijama od nekoliko herca vibracije prima unutarnje uho. Na nešto višim frekvencijama (10 — 15 Hz) vibracije ne čujemo uhom, već osjećamo pomoću živaca na koži. Mjerenja čovjekove osjetljivosti na potresanje provođena su podvrgavajući više osoba sinusoidnom potresanju promjenljive amplitude i frekvencije. Rezultate vidimo na sl. 6.8. u obliku *krivulja jednakog osjeta na potresanje.* Iz krivulja izlazi da je u blizini praga osjetljivosti na potresanje — uzevši sasvim općenito — i to u području od 5 — 10 Hz, osjet jednak za jednaku titrajnu brzinu. Na nižim frekvencijama osjet je približno proporcionalan ubrzanju, a u području iznad toga, amplitudi. Kad su to jake vibracije, na niskim frekvenijama osjet je približno proporcionalan zamahu (cm/s³), na višima — ubrzanju, a iznad otprilike 50 Hz — titrajnoj brzini.



Sl. 6.8. Frekvencijske karakteristike jednake osjetljivosti čovjeka na vibracije

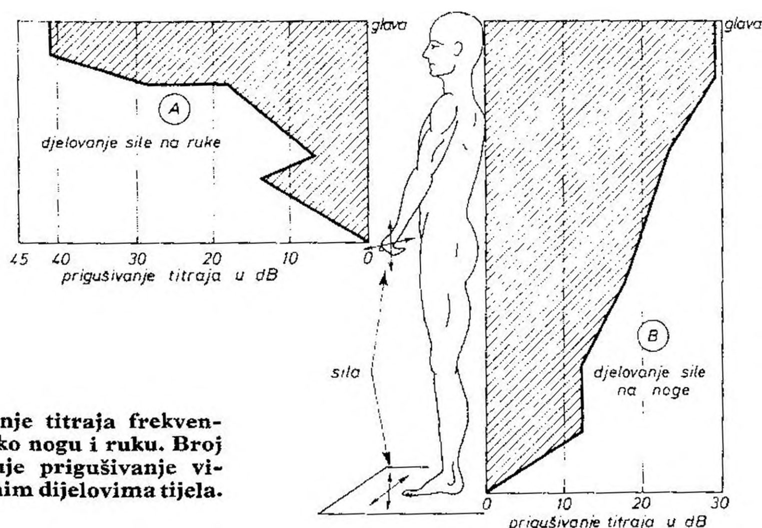
Osjetljivost na potresanje ovisi o osjetljivosti ispitivane osobe, o tome stoji li ona ili leži i je li smjer potresanja u smjeru osi tijela ili je za nju okomit itd. Iz krivulja se vidi da niske frekvencije tijelo podnosi i s većim amplitudama, a na višim frekvencijama već su i sasvim male amplitude neugodne.

Mehanički gledano čovječje je tijelo vrlo složen titrajni sustav koji je sastavljen od mnogo jednostavnih titrajnih sistema. Sl. 6.9. pojednostavnjena je mehanička shema čovječjeg tijela koja vrijedi za nisko frekvencijsko područje i za malene titrajne amplitude. U dijelu tijela između kukova i ramena nastaju pri frekvencijama 3 — 6 Hz izrazite rezonantne pojave. Zbog toga se teško podnose te frekvencije uz veće amplitude. Sistem koji tvori glava s vratom i ramenima ima rezonantne frekvencije između 20 i 30 Hz. Rezonantne su frekvencije očnih jabučica između 60 i 90 Hz, a donje čeljusti 100 — 200 Hz.



Prigušivanje titrajnih amplituda ovisi o mjestu na kojem djeluje sila. Dijagrami na sl. 6.10. prikazuju koliko je prigušenje na pojedinim dijelovima tijela ako sila djeluje na ruke i stopala. Kao što se može otčitati iz dijagrama, uz djelovanje sile na dlanove titranje glave je za 40 dB slabije, a ako sila djeluje na stopalo, slabije je za gotovo 30 dB.

Sl. 6.9. Pojednostavnjena mehanička shema čovječjeg tijela. Titranje ploče na kojoj čovjek stoji prenosi se na tijelo preko nogu.

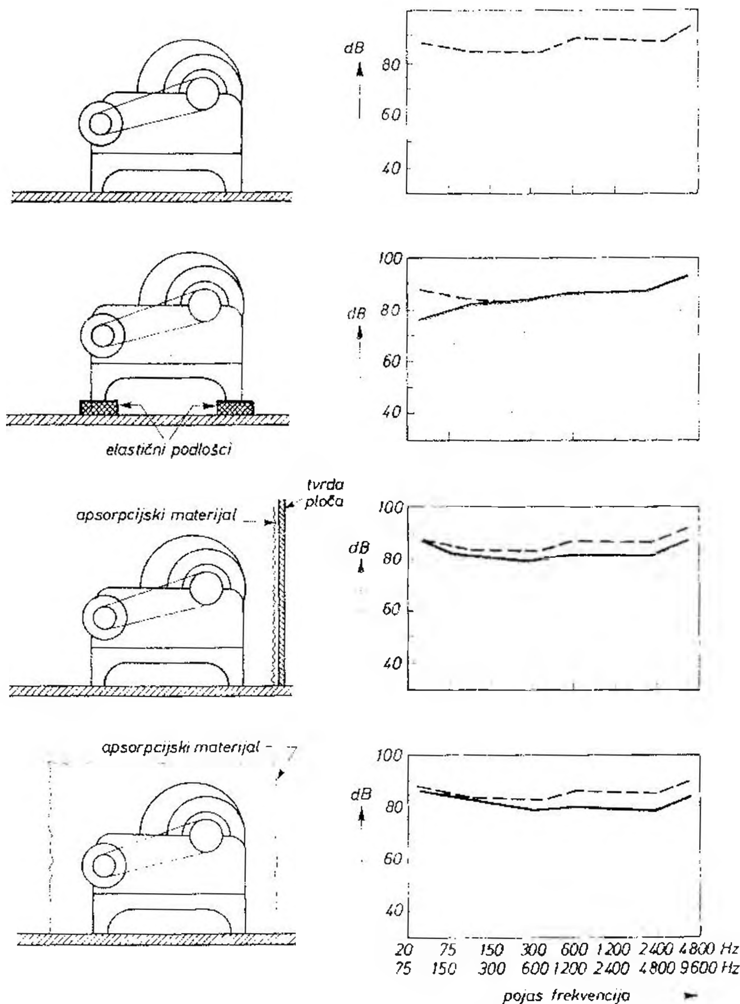


Sl. 6.10. Prenošenje titraja frekvencije od 50 Hz preko nogu i ruku. Broj decibela naznačuje prigušivanje vibracija na pojedinim dijelovima tijela.

6.4. MJERE I SREDSTVA PROTIV BUKE

Kako i čime ćemo se suprotstaviti buci, ovisi o tome na koji se način ona prenosi do mjesta na kojem smeta. U tom pogledu razlikuju se tri vrste:

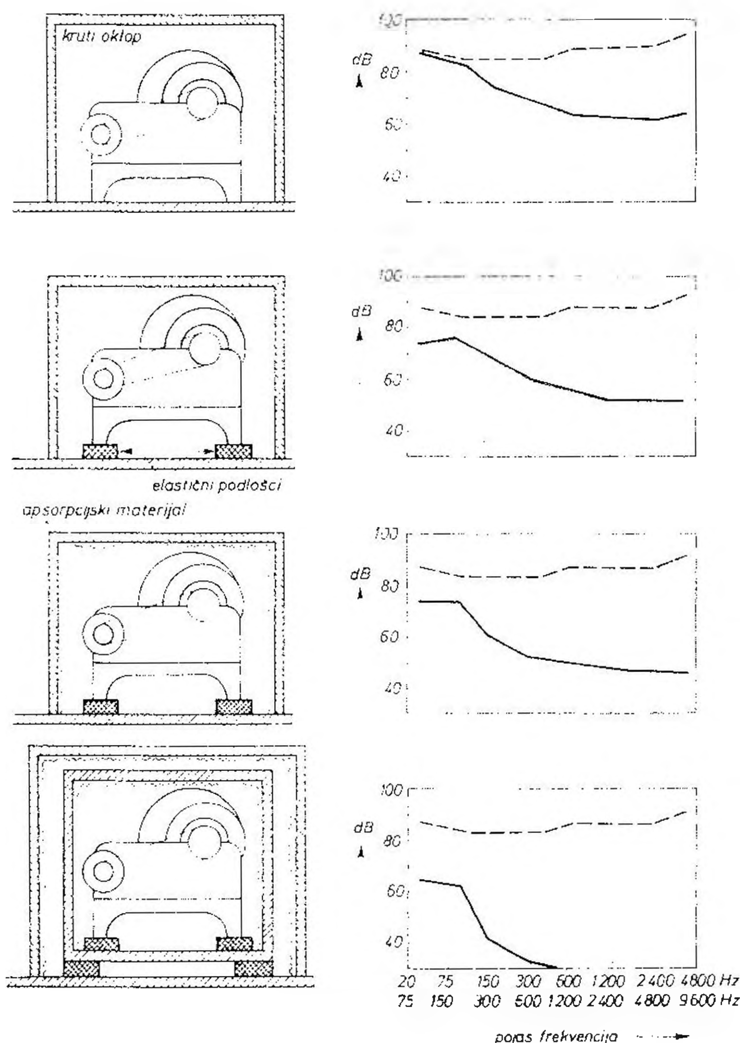
1. buka koja se stvara u prostoriji u kojoj smeta;
2. zračna buka koja se prenosi izvana ili iz druge prostorije u prostoriju u kojoj smeta;
3. vibracijska (strukturalna) buka, koja se u prostoriju u kojoj smeta prenosi preko građevinskih konstrukcija.



Sl. 6.11. Primjer kako razne izolacijske konstrukcije djeluju na spektar buke. Crtkana linija prikazuje spektar buke prije poduzimanja izolacijskih mjera, a puna nakon toga. Rezultati su dobiveni računski (prema Beraneku).

Ovdje ćemo se ukratko pozabaviti problemom kako smanjiti i prigušiti buku koja smeta u istoj prostoriji u kojoj se stvara.

Ako buku proizvodi neki stroj ili aparat, onda se ona najjednostavnije može smanjiti tako da se upotrijebi drugi stroj ili uređaj koji stvara manju buku. Često je prikladan postupak akustičko oklapanje izvora buke ili njegovo stavljanje na elastičnu podlogu. Takav primjer predočuje sl. 6.11. S porastom broja oklopnih ljuski povećava se prigušivanje. Dokle će se ići s oklapanjem, ovisi o tome kolika se redukcija buke želi postići.



Sl. 6.11/1. Primjer kako razne izolacijske konstrukcije djeluju na spektar buke. Crtkana linija prikazuje spektar buke prije poduzimanja izolacijskih mjera, a puna nakon toga. Rezultati su dobiveni računski (prema Beraneku).

U glavi o apsorpcijskim materijalima i konstrukcijama napomenuli smo da se buka smanjuje povećava li se apsorpcija zidova. To se dobiva i iz izraza za gustoću zvučne energije (uz pretpostavku da je zvučno polje difuzno; vidi *Prilog* 3):

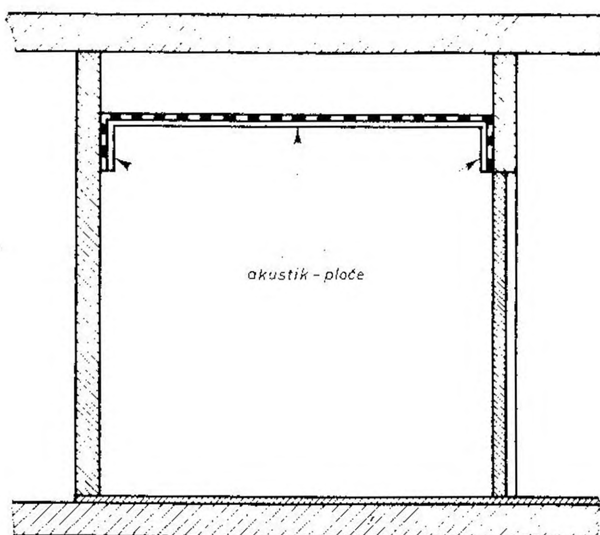
$$E = \frac{4P}{cA}$$

Sniženje razine buke dano je sa:

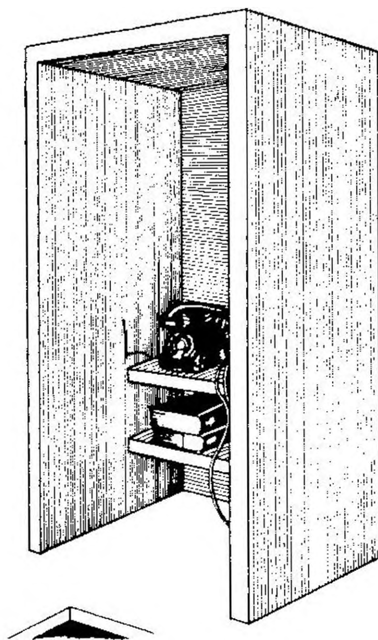
$$R = 10 \log \frac{A_{poslije}}{A_{prije}} \qquad (6.1)$$

gdje su A_{prije} i $A_{poslije}$ brojevi apsorpcijskih jedinica do akustičke obrade i nakon nje. Ako se broj apsorpcijskih jedinica povisi deset puta, snizit će se razina buke za 10 dB. Razumije se da taj pad neće biti jednak na svim frekvencijama jer ni apsorpcija nije jednaka za sve frekvencije.

Sl. 6.12. sadrži presjek izvedbe prigušnog stropa u bolničkom hodniku.



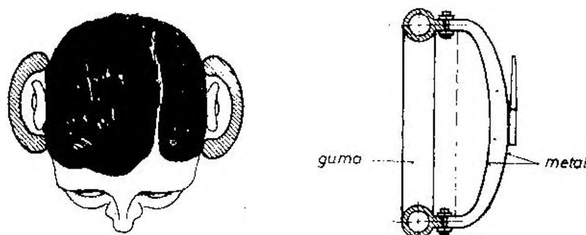
Sl. 6.12. Bolnički hodnik prigušen akustik-pločama. Prostor iznad prigušne konstrukcije može poslužiti za polaganje električkih vodova i ventilacijskih kanala.



Sl. 6.13. Telefonska kabina otvorenog tipa prigušena apsorpcijskim pločama

Ako se u nekoj prostoriji buka ne može dovoljno sniziti, to je moguće postići na malim površinama ograđivanjem apsorpcijskim materijalima. Takvu izvedbu vidimo na sl. 6.13. Širina prednjeg otvora telefonske kabine približno odgovara širini čovjekova tijela, tako da je kabina prilikom upotrebe i s te strane akustički donekle zatvorena. Tako se razina buke snizuje za 10 — 20 dB.

Ako buka ima tako visoku razinu da može oštetiti sluh, valja zaštitu provesti izravno na uhu, kao na sl. 6.14. Pomoću takvih naušnjaka buka se snizuje za 20 — 30 dB.



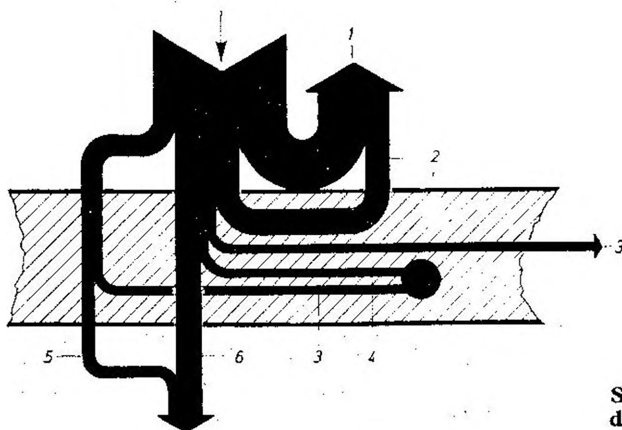
Sl. 6.14. Zaštitni naušnjaci protiv buke. Desno je njihov presjek.

6.5. PROLAZAK BUKE KROZ RAZDJELNE ZIDOVE

U građevinskoj se tehnici od pregradnih zidova zahtijeva ne samo da imaju određenu mehaničku čvrstoću i da budu dobri toplinski izolatori nego i da osiguravaju stanovitu akustičku izolaciju jedne prostorije od druge. Zvuk kroz zidove u principu prolazi na tri načina:

1. kroz pore i rupe u zidu;
2. longitudinalnim titranjem u materijalu zida;
3. titranjem savijanja zida.

Shema na sl. 6.15. prikazuje što se događa s energijom zvuka pri udaru njegovih valova o tanak zid. Jedan dio energije (1) reflektira se od zida i vraća natrag u prostoriju. U prostoriju se vraća i onaj dio energije (2) koji zid emitira titrajući kao membrana. Dio energije (3) utroši se putujući uzduž zida. U susjednu pro-



Sl. 6.15. Shematski prikaz razdiobe zvučne energije koja prispijeva na zid

storiju prođe zvučna energija dijelom u obliku longitudinalnih valova i valova savijanja (6), a djelomično kroz zidne pore (5). Prilikom prolaska na jedan i na drugi način dio se energije (3) i (4) pretvori u zidu u toplinu.

Pod zvučnom propusnošću q razumijeva se odnos zvučne snage P_2 koju pregrada propusti i zvučne snage P_1 koja dolazi na pregradu:

$$q = \frac{P_2}{P_1} \tag{6.2}$$

Zvučno prigušivanje R definirano je logaritmom recipročne vrijednosti zvučne propusnosti:

$$R = 10 \log \frac{1}{q} = 10 \log \frac{P_1}{P_2} \text{ (dB)} \tag{6.3}$$

Kako se prilikom mjerenja zvučnog prigušivanja mjeri zvučni tlak ispred pregrade i iza nje, za izračunavanje prikladnija je formula:

$$R = 20 \log \frac{p_1}{p_2} \text{ (dB)} \tag{6.4}$$

Uz pretpostavku da je zvučno polje difuzno u obje prostorije — u onoj u kojoj se zvuk emitira i u susjednoj gdje se on prima — dolazi na ispitivanu pregradu između prostorija zvučna energija E_1S. Tu je E_1 gustoća zvučne energije u prostoriji u kojoj je izvor zvuka, a S površina pregrade. U susjednu prostoriju proći će kroz pregradu zvučna energija E_1Sq. Pošto je uspostavljena ravnoteža, ta je zvučna energija jednaka apsorbiranoj, tj. jednaka je $E_2 \cdot A_2$, gdje je E_2 gustoća zvučne energije u susjednoj prostoriji, a A_2 je apsorpcija te prostorije. Iz tog odnosa izlazi:

$$E_2 = \frac{q \cdot S}{A_2} E_1 \tag{6.5}$$

Jednadžbu (6.5.) možemo napisati i ovako:

$$E_2 = \frac{q \cdot S}{A_2} E_1 = \frac{4qSP}{cA_1A_2} \tag{6.6}$$

Izraz otkriva da se gustoća zvučne energije u prijemnoj prostoriji može smanjiti na više načina:

1. Smanjivši zvučnu snagu P koju emitira izvor buke ili povećavši apsorpciju A_1. To je moguće učiniti samo onda ako snaga P ne ovisi o apsorpciji A_1, kao što je to kod pisaćeg stroja. Ako je riječ o radio-aparatu, slušatelj će regulatorom povećati zvučnu snagu da bi uz veću apsorpciju A_1 dobio jednaku glasnoću.
2. Smanjivanjem površine zida S. To je u gotovoj građevini moguće učiniti samo tako da se prostorija pregradi, dakle na štetu njezina volumena, što je teško prihvatljivo.
3. Smanjivši zvučnu propusnost q zida, odnosno povećavši zvučno prigušivanje R.
4. Povećavši apsorpciju A_2 u prijemnoj prostoriji.

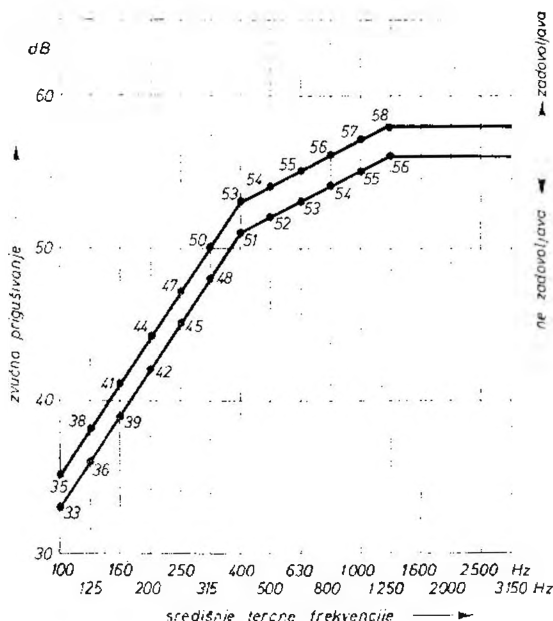
Jednadžba (6.6) vrijedi, kao što je napomenuto, samo ako je zvučno polje u obje prostorije difuzno. Budući da ono u blizini izvora buke nije takvo, taj izraz ne odgovara ako su izvor i prijemnik u blizini pregradnog zida.

6.5.1. Izračunavanje zvučne izolacije

U građevinskoj se akustici zvučno prigušivanje mjeri u frekvencijskom području od 100 do 3 150 Hz. Frekvencije se niže od 100 Hz zanemaruju jer je tu uho vrlo male osjetljivosti, mjerenje je zvučnog prigušivanja u tom frekvencijskom području vrlo netočno i, osim toga, uz uobičajenu buku u stanovima amplitude zvučnog tlaka na tim frekvencijama vrlo su malene. Vrijednosti iznad 3 150 Hz ne uzimaju se zato što je u tom području spektar buke u stanovima nizak, a zvučno je prigušivanje pregrada visoko. Sve su to razlozi da se i samim krajnjim frekvencijama prilikom izračunavanja daje manja važnost.

Srednje zvučno prigušivanje *R* dobiva se kao aritmetička srednja vrijednost svih zvučnih prigušivanja mjerenih u 16 tercnih područja na središnjim frekvencijama između 100 i 3150 Hz. Budući da su krajnje terce, iz već spomenutih razloga, malog značenja, to se uzimaju njihove polovične vrijednosti. Stoga se zbroj svih 16 iznosa dijeli s 15. Na temelju podataka u tablici 6.2. u 2. stupcu dobiva se za *R* vrijednost od 45 dB. Ovom načinu izračunavanja zvučnog prigušivanja može se prigovoriti da ne uključuje oblik spektra buke, a također da frekvencijski pojasovi s izrazito lošim prigušivanjem mogu biti kompenzirani onima kojima je prigušivanje vrlo dobro. Izostavlja se, dakle, slušni utjecaj buke.

Tražeći prikladniji način kako da se dobije zvučno prigušivanje pregrade, došlo se do postupka koji je prihvatila međunarodna organizacija za standardizaciju ISO. Prema toj preporuci (ISO/R717—1968), koju su usvojile mnoge zemlje, standardne krivulje zvučne izolacije imaju oblik prikazan dijagramima na sl. 6.16. Gornja krivulja vrijedi za laboratorijske uvjete, a donja se — za 2 dB niža — upotrebljava uz uvjete u praksi kad nužno nastaje *zaobilazno provođenje zvuka*. Vrijed-



Sl. 6.16. Standardne krivulje zvučne izolacije pregrada. Gornja krivulja vrijedi za laboratorijska ispitivanja, a donja za pregrade u praktičkoj izvedbi.

Središnje terene frekvencije Hz	Zvučno prigušivanje pregrade dB	Vrijednosti standardne krivulje dB
1	2	3
100	34,7	33,0
125	38,8	36,0
160	38,9	39,0
200	40,2	42,0
250	41,2	45,0
315	41,4	48,0
400	42,7	51,0
500	43,8	52,0
630	44,8	53,0
800	46,3	54,0
1000	47,2	55,0
1250	49,0	56,0
1600	50,2	56,0
2000	52,2	56,0
2500	54,1	56,0
3150	57,5	56,0

Zbroj nepovoljnih odstupanja

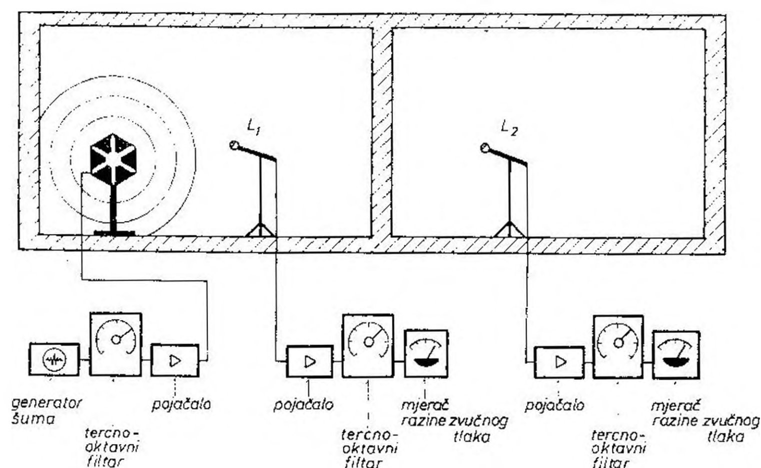
$$\frac{\text{Zbroj nepovoljnih odstupanja}}{15}$$

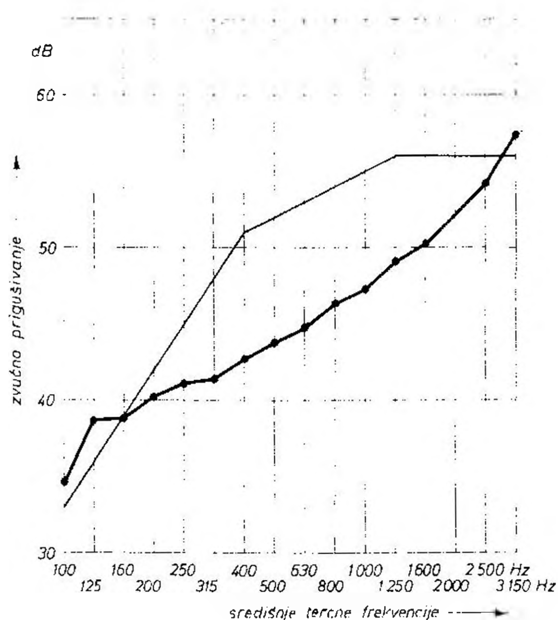
T a b l i c a 6.2.

Odstupanja od standardne krivulje dB	Nepovoljna odstupanja od standardne krivulje dB	Vrijednosti standardne krivulje spuštene za 4 dB dB	Nepovoljna odstupanja od spuštene standardne krivulje dB
4	5	6	7
+ 1,7	0	29,0	0
+ 2,8	0	32,0	0
— 0,1	0,1	35,0	0
— 1,8	1,8	38,0	0
— 3,8	3,8	41,0	0
— 6,6	6,6	44,0	2,6
— 8,3	8,3	47,0	4,3
— 8,2	8,2	48,0	4,2
— 8,2	8,2	49,0	4,2
— 7,7	7,7	50,0	3,7
— 7,8	7,8	51,0	3,8
— 7,0	7,0	52,0	3,0
— 5,8	5,8	52,0	1,8
3,8	3,8	52,0	0
— 1,9	1,9	52,0	0
+ 1,5	0	52,0	0
	71,0		27,6
	4,7		1 < 1,84 < 2

nosti iznad krivulje pozitivna su odstupanja, a one ispod nje negativna. Kao što se odmah uočava, krivulje su približno oblika *filtarske krivulje A* što je ima zvukomjer, i uz koju se dobiva razina zvučnog tlaka u dB (A).

Osnovica za standardne krivulje su frekvencijske karakteristike zvučnog prigušivanja koje imaju iskušane konstrukcije u stambenoj izgradnji. Idealizirana krivulja prigušivanja zida od pune opeke koji je debeo 24 cm i ožbukan s obje strane, standardna je ISO-krivulja. No, valja napomenuti da se ona ne može smatrati idealnom u svakom slučaju. Nepovoljna odstupanja u frekvencijskom području od 200 do 1000 Hz slušno više smetaju nego isto takva na niskim i visokim frekvencijama.



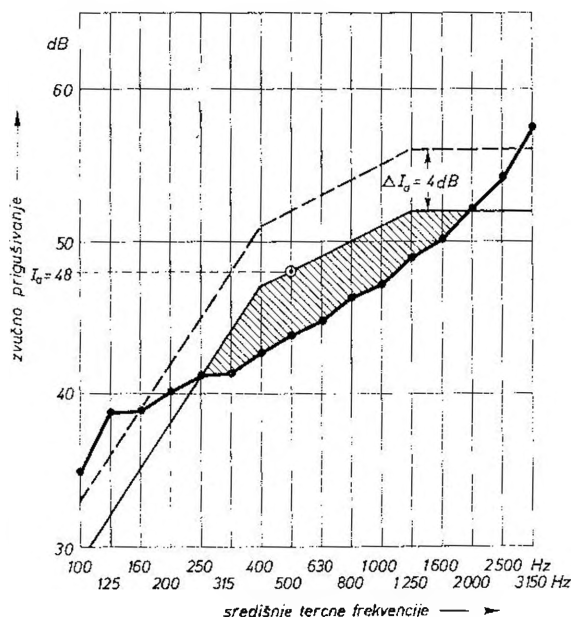


Sl. 6.17. Gore: mjerni uređaj za ispitivanje zvučne izolacije pregrade. Dolje: krivulja zvučne izolacije dobivena mjerenjem po tercnim pojasovima

Uspoređujući krivulje dobivene mjerenjem s onom koja vrijedi kao standardna, dobiva se mogućnost da se ocijeni vrijednost zvučnog prigušivanja (sl. 6.17). No na osnovi takve ocjene ne može se znati da li pregrada zadovoljava. Stoga postoji dogovor prema kojemu je dopušteno da srednje nepovoljno odstupanje može iznositi najviše 2 dB, ili u jednoj terci najviše 8 dB. Kad se proračunava srednje nepovoljno odstupanje, postupa se tako da se vrijednosti koje su iznad krivulje (u području povoljnog odstupanja) uzimaju kao da *leže na krivulji*, tj. kao da je odstupanje jednako nuli. Time se izbjegava da se mjesta osobito dobroga zvučnog prigušivanja kompenziraju onima izrazito lošeg prigušivanja. Ako ima nepovoljnih odstupanja na središnjim frekvencijama od 100 i 3150 Hz, ona se u račun uzimaju s polovičnim vrijednostima. Kao razlog za to vrijedi ono što je već prije rečeno u vezi s tim frekvencijama. Tome valja dodati da je točnost mjerenja u građevinskoj akustici ograničena, i da međusobno potpuno slične konstrukcije nemaju jednake akustičke osobine jer su razlike u izvedbi neizbježne.

Da bi se zvučna izolacija izrazila jednim brojem, mora se postupiti na određen način. Standardna se krivulja vertikalno i paralelno spušta za cijeli broj decibela sve dotle dok se dobije srednje nepovoljno odstupanje u vrijednosti manjoj od 2 dB, ali većoj od 1 dB. Pri tome odstupanje u jednoj terci ne smije premašiti 8 dB. Pomak krivulje izražen u decibelima uz koji su zadovoljeni spomenuti uvjeti daje zvučnu izolaciju ΔI_a.

U tablici 6.2. izražen je način izračunavanja zvučne izolacije na osnovi krivulje u dijagramu na sl. 6.17. Vrijednosti su iznad krivulje pozitivnog predznaka, a one ispod nje su negativne. U 5. stupcu za pozitivna je odstupanja uzeto kao da su na standardnoj krivulji i prema tome imaju vrijednost 0 dB. Da su odstupanja na frekvencijama od 100 i 3150 Hz negativna, trebalo bi ih uzeti s polovičnim vrijednostima. Zbroje li se sve vrijednosti u 5. stupcu i zbroj podijeli s 15, dobiva se da je srednje nepovoljno odstupanje 4,7 dB, dakle je veće od 2 dB. Pomaknuvši standardnu krivulju za 4 dB nadolje (sl. 6.18. i u tablici 6.2. stupac 6. i 7.), dobiva se srednje odstupanje od 1,84 dB. To zadovoljava uvjet prema kojemu ta vrijednost mora biti između 1 i 2 dB. Iz opisanog postupka i proračuna izlazi da zvučna izolacija ΔI_a iznosi — 4 dB.



Sl. 6.18. Pomak standardne krivulje prema izmjerenoj kako bi se dobila vrijednost zvučne izolacije ΔI_a

Za jednoslojne zidove ili pregrade s tipičnom frekvencijskom karakteristikom zvučnog prigušivanja koja raste prema visokim frekvencijama, može se zvučna izolacija grubo približno izračunati tako da se srednje zvučno prigušivanje R smanji za 50 dB:

$$\Delta I_a \approx R - 50\,(dB) \tag{6.7}$$

U tablicu 6.3. uvrštene su vrijednosti zvučne izolacije i pripadne približne vrijednosti srednjega zvučnog prigušivanja, uz podatke kakva je čujnost normalna razgovora, vrlo glasna razgovora i glazbe na radiju u susjednoj prostoriji.

Pod indeksom zvučne izolacije I_a razumijeva se broj decibela koji pripada sjecištu pomaknute standardne krivulje s vertikalom na frekvenciji od 500 Hz. Na sl. 6.18. to je iznos od 48 dB, što je približno jednako srednjemu zvučnom prigušivanju R.

Prema njemačkim normama (DIN 4109) zvučna se izolacija izražava iznosom „*zvučne zaštitne mjere*" (Luftschutzmass = *LSM*), za koju približno vrijedi:

$$LSM \approx I_a - 52\,(dB) \tag{6.8}$$

Donja standardna krivulja na sl. 6.16. odnosi se na sve slučajeve u kojima je buka slična spektra onoj u stanovima. To vrijedi za pregradne zidove u školama, dječjim ustanovama, hotelima, uredima i sl. Krivulja ne vrijedi za pregradne zidove u industrijskim građevinama ni za izvanjske zidove stambenih zgrada, a isto tako ni za prozore.

Tablica 6.3.

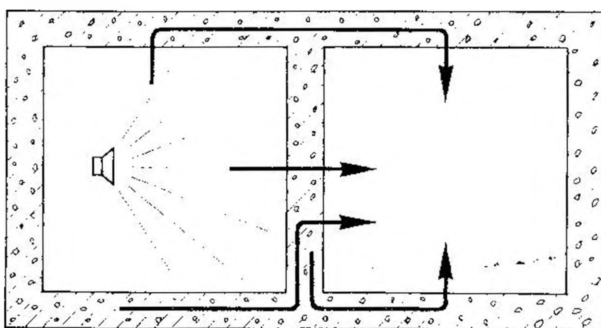
Zvučna izolacija ΔI_a dB	Indeks zvučne izolacije I_a dB	Normalan razgovor	Vrlo glasan razgovor	Glazba na radiju
−20	≈30	dobro razumljiv	vrlo dobro razumljiv	dobro čujna
−10	≈40	razumljiv	dobro razumljiv	čujna
0	≈50	nerazumljiv	djelomično razumljiv	slabo čujna
+10	≈60	nečujan	nerazumljiv	nečujna
+20	≈70	nečujan	nečujan	nečujna

Katkad se može naići na mišljenje nestručnjaka da bi za prigušivanje zvuka bilo dobro upotrijebiti materijale velikoga koeficijenta apsorpcije. Najbolji materijali apsorbiraju od upadne zvučne energije prosječno 90%. Ostalih 10% prolazi kroz materijal. To znači da zvučno prigušivanje iznosi samo 10 dB. Zvučno prigušivanje zidova koji dobro izoliraju od zvuka čak je 60 dB, a to znači da samo 10^{-6} dio upadne energije prođe kroz zid. Kad bi se to prigušivanje zasnivalo samo na apsorpciji, koeficijent bi apsorpcije iznosio 99,9999%!

6.5.2. Jednostavan neporozan zid

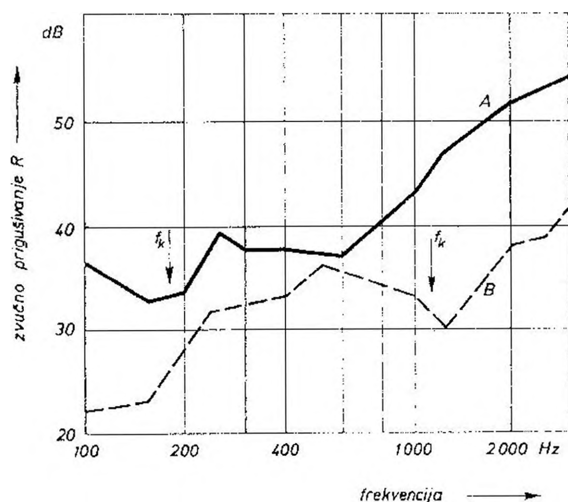
Zvuk proizveden u jednoj prostoriji ne prolazi u susjednu samo kroz razdjelni zid već, kao što je prikazano na sl. 6.19, i drugim putovima. To bi značilo da se ne može govoriti o izolacijskoj moći samoga pregradnog zida. No ima načina da se za specijalne svrhe, radi mjerenja, otklone mogućnosti prijelaza drugim putovima, osim kroz sam zid (vidi sl. 6.42).

Još 1910. godine dobili su *Berger* i *Weisbach* eksperimentalnim putem ove rezultate u vezi sa zvučnim prigušivanjem jednostavnoga neporoznog zida:



Sl. 6.19. Iz jedne prostorije u drugu zvuk prolazi ne samo izravno kroz pregradni zid već i zaobilaznim putovima.

1. Zvučno prigušivanje ovisno je o frekvenciji, i to s njom raste. Taj poras nije strogo po pravcu, već je nepravilan, kao na sl. 6.20.
2. Zvučno prigušivanje ovisi o masi zida po jedinici površine. Što je on veće specifične mase, zvučno je prigušivanje veće.



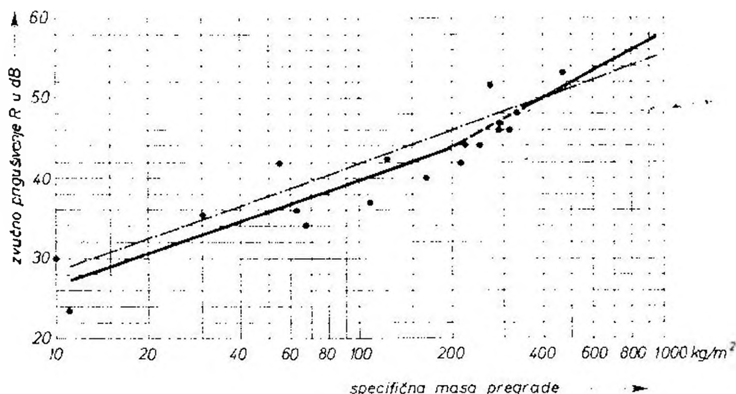
Sl. 6.20. Frekvencijska ovisnost zvučnog prigušivanja. Krivulja A odnosi se na zid od 1/4 opeke, ožbukan s obje strane, a krivulja B vrijedi za zrcalno staklo koje ima specifičnu masu od 30 kg/m². f_k su koincidentne frekvencije.

Na sl. 6.21. prikazano je dijagramom kako srednje zvučno prigušivanje ovisi o masi zida po m². Krivulja spaja statističke srednje vrijednosti dobivene na temelju mnogobrojnih mjerenja zvučnog prigušivanja različitih materijala. Točke u dijagramu odnose se na vrijednosti u tablici 6.4.

Karakteristika prigušivanja na sl. 6.21. sastoji se od dva dijela. Nagib prvog dijela je približno 4 dB, a drugoga oko 6 dB po udvostručenju mase zida po m².

Ta se lomljena karakteristika može zamijeniti pravcem koji je na slici naznačen crtkano, a da se ne učini velika pogreška. Jednadžba tog pravca glasi (M je masa pregrade u kg po m²):

$$R = 14 + 14 \log M \text{ (dB)} \tag{6.9}$$



Sl. 6.21. Srednje zvučno prigušivanje jednostrukih pregrada ovisno o masi pregrade po kvadratnom metru

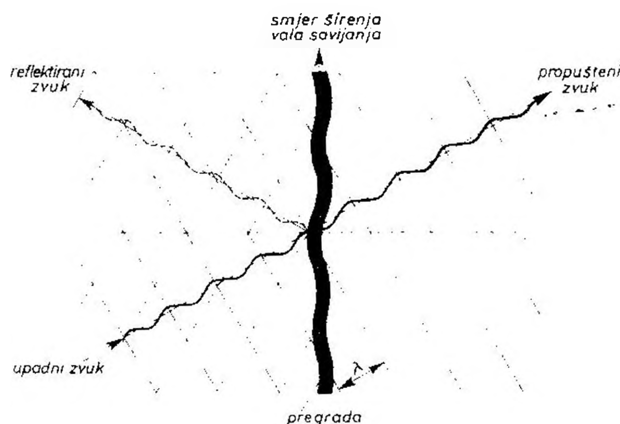
Tablica 6.4.

Debljina pregrade cm	Građevni element	Masa pregrade kg/m²	Srednje zvučno prigušivanje dB
1,5	Šperploča masivna	11	23
1,5	Šperploča savitljiva zbog urezanih brazda	10	30
1,2	Zrcalno staklo	30	35
4,2	Gumena ploča	55	44
7	Pjenušavi beton	65	36
8,5	Sadrene platnice	68	34
11	Lagani betonski blokovi	105	37
12	Plovučac	120	42
9	1/4 pune opeke	167	40
21,5	Lagani betonski blokovi	215	44
15	1/2 pune opeke	250	45
28	Šuplji blokovi	290 – 320	46 – 49
28	Opeka s uzdužnim rupama	305	46
28	Naplavni kamen	325	48
28	Opeka s poprečnim rupama	470	53
—	Strop sa šupljim elementima	210 – 250	42 – 44
12 – 14	Strop s punim elementima	300 – 350	47 – 48
20	Armirani betonski strop	260	51

Napomena: Građevni elementi od petoga naniže su ožbukani.

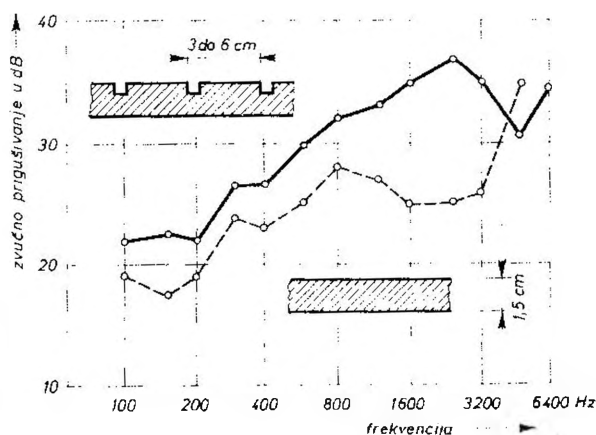
Kad bi zvučno prigušivanje ovisilo samo o masi zida, ne bi krivulje na sl. 6.20. imale nepravilan tok. Iz toga izlazi da se ne smiju zanemariti ni ostale osobine zida, a to je u prvom redu titranje savijanjem. Valna duljina takva titranja ovisi o masi zida, elastičnosti materijala i frekvenciji. Može se dogoditi da duljina valova savijanja bude na nekoj frekvenciji upravo jednaka emitiranoj valnoj duljini u zraku. Na toj frekvenciji, takozvanoj *koincidentnoj frekvenciji*, emitira zid vrlo mnogo

zvučne energije, i zvučno se prigušivanje jako smanji (sl. 6.22). Stoga koincidentna frekvencija treba da bude ili vrlo niska (ispod 50 Hz) ili dovoljno visoka (iznad 4 000 Hz), da u najvažnijem području frekvencija ne bi došlo do suviše velikog smanjenja zvučnog prigušivanja.



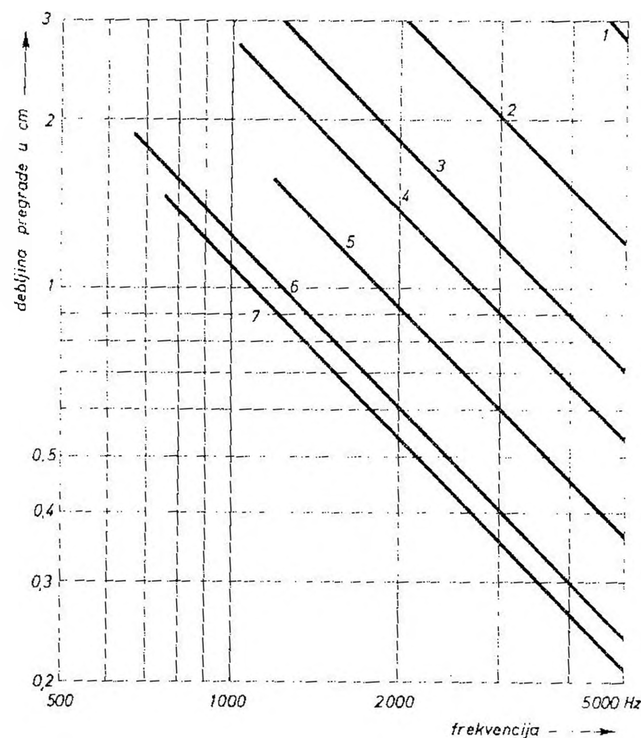
Sl. 6.22. Shematski prikaz prolaska zvuka kroz pregradu pri određenom kosom upadu

Prikazat ćemo poučan primjer pomaka koincidentne frekvencije naviše. Riječ je o šperploči debljine 1,5 cm, kakva se upotrebljava npr. za izradu vrata. Iz dijagrama na sl. 6.23, dobivenog mjerenjem, vidi se da se prigušivanje iznad 1 500 Hz spušta jer se u tom području nalazi koincidentna frekvencija. Karakteristika prigušivanja može se znatno popraviti urezivanjem paralelnih brazda na razmaku od 3 do 6 cm. Time se masa gotovo ne promijeni, ali se krutost znatno smanji.

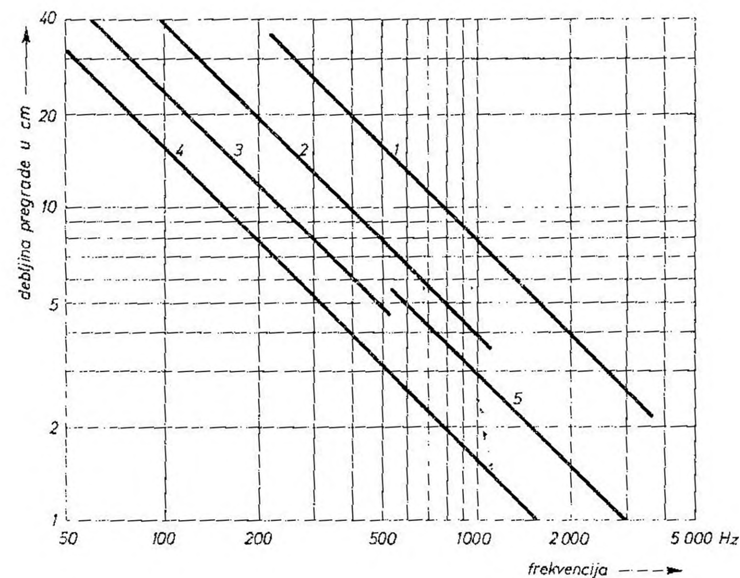


Sl. 6.23. Frekvencijska karakteristika zvučnog prigušivanja šper-ploče prije urezivanja brazda (crtkana linija) i nakon toga (puna crta)

Kao što se zapaža iz dijagrama, koincidentna frekvencija tako obrađene ploče pomakla se u područje u kojem smanjenje prigušivanja nije važno. Osim toga, prigušivanje je na svim frekvencijama veće nego bez urezanih brazda.



Sl. 6.24. Koincidentna frekvencija ovisno o debljini ploče: 1 - ploča od drvenih vlakanaca, 2 - drvo omorike, okomito na vlakanca, 4 — sadrene (gipsane) ploče, 5 - šperano drvo, 6 — drvo bukve ili omorike, paralelno s vlaknima, također limovi i 7 — staklo.



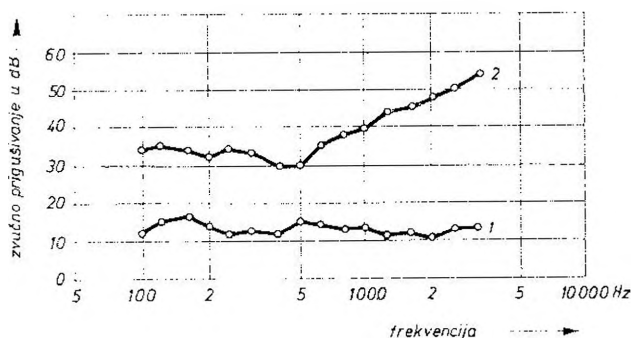
Sl. 6.25. Koincidentna frekvencija pregrada i zidova ovisno o njihovoj debljini: 1 — ploča od drvene vune sa slojem vapnene žbuke, 2 — zid od opeke, s vapnenom žbukom, 3 — klinker-opeka, s cementnom žbukom, 4 — teški beton sa sadrom za taracanje i 5 — građevna sadra

Na sl. 6.24. i 6.25. dijagramima je prikazana ovisnost koincidentne frekvencije o debljini pregrade od različitih materijala. Uzmimo za primjer zid od opeke debeo 12 cm. Iz dijagrama na sl. 6.25. izlazi da je koincidentna frekvencija 300 Hz. To znači, kad je potrebno postići veće zvučno prigušivanje buke u kojoj su prisutne sasvim niske frekvencije, treba upotrijebiti ili znatno deblji zid ili sagraditi zid od drugog materijala, npr. teškog betona. Time će se, naime, koincidentna frekvencija pomaknuti naniže, u područje gdje nije opasna.

6.5.3. Jednostavan porozan zid

Kroz porozan zid prolazi zvuk na dva načina: *kroz pore* i *titranjem zida*. Budući da kroz pore prolazi velik dio zvučne energije, zvučno je prigušivanje poroznog zida uvijek manje nego neporoznog zida jednake mase po m².

Dijagrami zvučnog prigušivanja na sl. 6.26. prikazuju kakva je razlika u propusnosti zvuka poroznoga betonskog zida debeloga 10 cm ako je ožbukan i kad nije ožbukan. Masa zida bez žbuke je oko 43 kg/m², a prosječno zvučno prigušivanje iznosi samo 13 dB. Iz horizontalnog toka krivulje može se zaključiti da je zid porozan. Zvučno prigušivanje neporozna zida iste mase iznosi oko 35 dB. Nakon žbukanja porasla je masa zida na 70 kg/m², a zvučno prigušivanje na 39 dB. Jednako prigušivanje postiže se i neporoznim zidom ove mase.



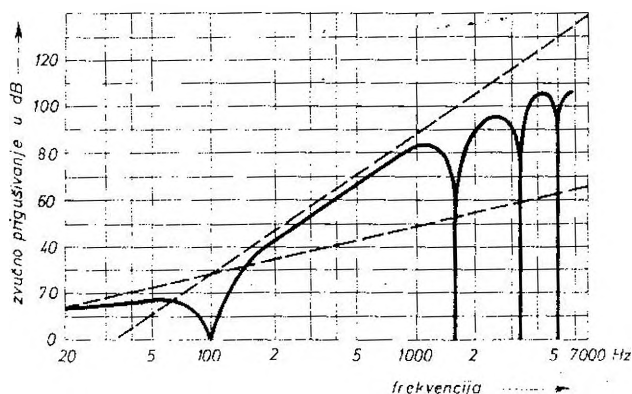
Sl. 6.26. Frekvencijske karakteristike zvučnog prigušivanja poroznoga betonskog zida debljine od 10 cm: 1 — bez žbuke i 2 — sa žbukom

6.5.4. Dvostruk neporozan zid

Iz onoga što je dosad rečeno očito je da zvučno prigušivanje ovisi *o masi pregrade po jedinici površine*. Ima mogućnosti da se uz relativno malu masu pregrade postigne veliko zvučno prigušivanje. To daje *dvostruka*, odnosno *višestruka pregrada*.

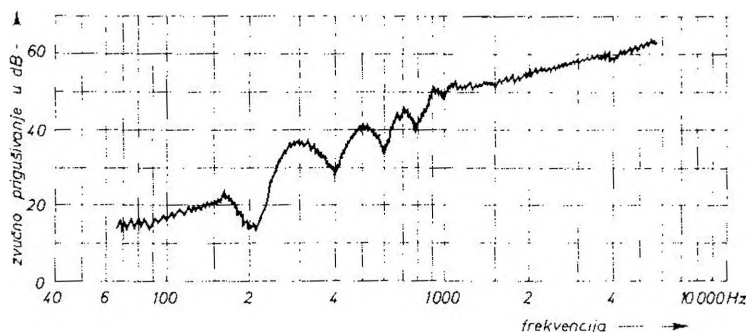
Uz stanovite pretpostavke može se izračunati zvučno prigušivanje dvostruke pregrade. Rezultat je u dijagramskom prikazu na sl. 6.27. Dijagram vrijedi za dvostruku pregradu od stakla debelu 3 mm, mase od 7,5 kg/m², razmaka 10 cm između ploča. Na području sasvim niskih frekvencija, ispod 50 Hz, zvučno je prigušivanje jednako onome u jednostavne pregrade jednake mase po jedinici površine koju imaju obje pregrade zajedno. Na frekvenciji od 100 Hz zvučno prigušivanje pada na nultu vrijednost zbog vlastitog titranja pregrada jedne prema

drugoj. Zračni jastuk čini oprugu koja je to kruća što je razmak među pregradama manji. Na tu „oprugu" vezane su mase pregrada, što zajedno daje titrajni sistem, u našem primjeru s rezonantnom frekvencijom na 100 Hz. Što su pregrade više razmaknute, rezonantna je frekvencija niža. Poslije rezonantne frekvencije pa sve do 1 000 Hz raste zvučno prigušivanje mnogo brže nego do 50 Hz, i na višoj je razini. Na frekvencijama od 1 600, 3 200 i 4 800 Hz također pada zvučno prigušivanje na nulu, i to zbog vibracija pregrada u vezi s elastičnošću zračnog jastuka.



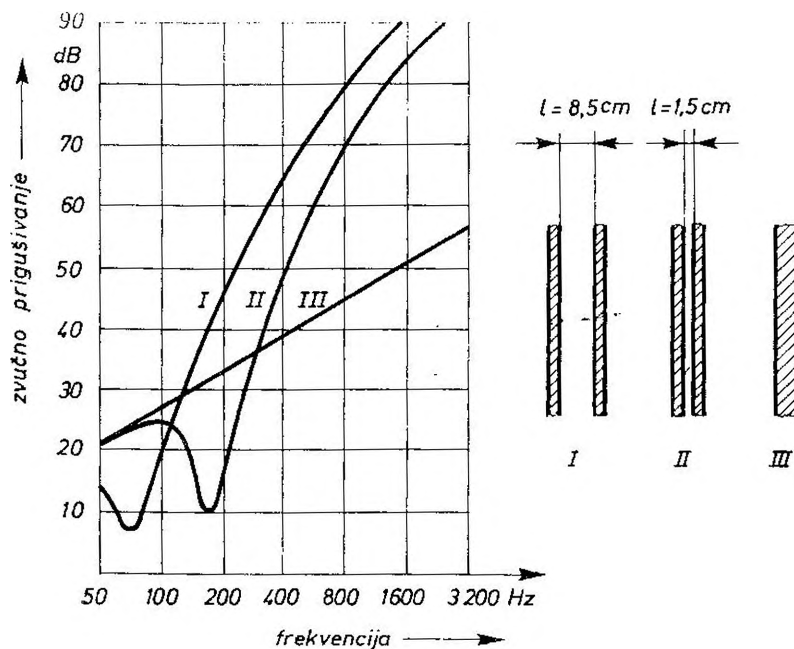
Sl. 6.27. Teorijska frekvencijska karakteristika zvučnog prigušivanja dvostruke pregrade od staklenih ploča koje imaju debljinu od 3 mm i specifičnu masu od 7,5 kg/m², s razmakom između ploča od 10 cm

Opadanje zvučnog prigušivanja na određenim frekvencijama nije tako kritično kao što izlazi iz teorijskog dijagrama na sl. 6.27. To se zapaža iz krivulje na sl. 6.28. snimljene logaritamskim pisačem, koja se odnosi na jedan dvostruki prozor.



Sl. 6.28. Frekvencijska karakteristika zvučnog prigušivanja dvostrukog prozora dobivena snimanjem

Dijagram na sl. 6.29. prikazuje osnovnu razliku u zvučnom prigušivanju između jednostruke i dvostruke pregrade. Te karakteristike vrijede za idealne uvjete, kad nema zaobilaznog odvođenja zvuka. Ako su pregrade od različita ma-



Sl. 6.29. Frekvencijske karakteristike zvučnog prigušivanja dvostrukog zida sa specifičnom masom pojedinog zida od 12 kg/m², ili ukupnom specifičnom masom od 24 kg/m²

terijala i razne debljine, svaka od njih može titrati na drugi način, jer su različitih prirodnih frekvencija, pa stoga i dijagram prigušivanja odstupa od idealnoga.

Dvostruke pregrade, ili zidovi, dimenzioniraju se tako da prva rezonantna frekvencija padne na donju granicu čujnog područja. To se može postići razmakom između zidova koji treba da iznosi najmanje:

$$l_{min} = \frac{140}{M} \cdot (\text{cm}) \qquad (6.10)$$

M je masa pojedinog zida u kg/m².

Za dvostruki zid s nejednakim pojedinim zidovima vrijedi:

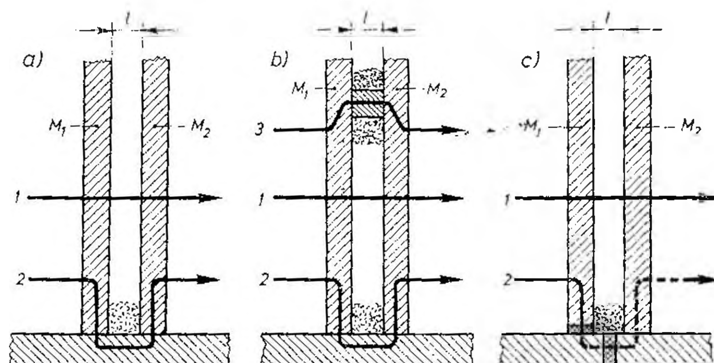
$$l_{min} = \frac{70}{M_2} (\text{cm}) \qquad (6.11)$$

Tu je M_2 masa lakšeg zida u kg/m².

Obično se preporučuje da pojedini elementi dvostrukog zida ne budu jednake mase po m², kako im rezonantne frekvencije ne bi bile jednake. *Ingerslev* ističe da zbog različitih učvršćenja na rubovima ne može rezonantna frekvencija inače jednakih zidova biti ista. Prema tome nema nikakve prednosti u izvedbi dvostrukog zida da su mu pojedini zidovi različiti.

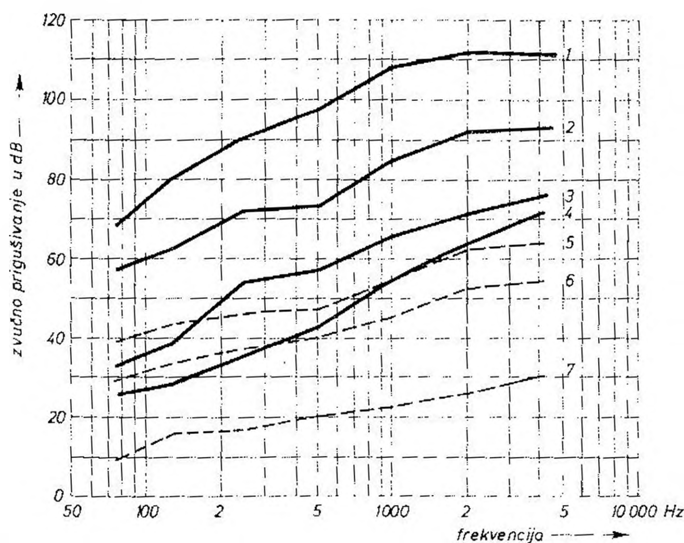
Zvučno prigušivanje kontinuirano raste s povećavanjem razmaka između pojedinih zidova, i to sve do vrijednosti koja je jednaka zbroju zvučnih prigušivanja pojedinih zidova. Ovo vrijedi onda ako između zidova nema mehaničke veze, i kad je prostor među njima dovoljno prigušen. Prigušivanje se može izvesti ispunjavanjem bilo cijelog prostora prigušnim materijalom, npr. staklenom vunom, bilo samo na rubovima.

Između pojedinih zidova ne smije biti ni hotimičnih ni slučajnih „mostova" preko kojih bi, kao na sl. 6.30.*b*, putem 3 zvuk mimoišao zračni jastuk. Isto tako treba paziti da zvuk ne prelazi preko elemenata za rubno učvršćenje (na sl. 6.30.*a* putem 2), što se može spriječiti umećući prigušne materijale kao na sl. 6.30.*c*.



Sl. 6.30. Prolazak zvuka kroz dvostruku pregradu: 1 — kroz zračni sloj, 2 — preko rubnog učvršćenja i 3 — preko „mostova"

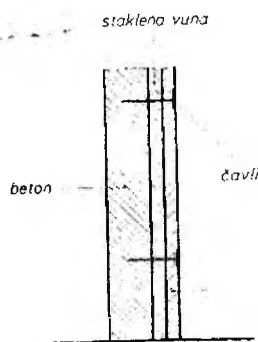
Na sl. 6.31. mjerene su krivulje zvučnog prigušivanja koje se odnose na dvostruke zidove razne izvedbe. Radi usporedbe na istoj su slici i krivulje koje vrijede za neke jednostavne zidove.



Sl. 6.31. Zvučno prigušivanje dvostrukih pregrada. 1 — dvostruki zid od opeke 1/1, ožbukan, uz zračni sloj od 12 cm i između zidova dva sloja staklene vune po 50 mm; 2 — betonski zid od 20 cm, uz zračni sloj od 12 cm i zid od opeke 1/2, a između zidova su dva sloja staklene vune po 25 mm; 3 — zid od opeke 1/2, ožbukan, uz zračni sloj od 4 cm i betonski zid od 7 cm, a između zidova je staklena vuna od 25 mm; 4 — sadreni zid debljine od 13 mm, uz 14 mm staklene vune, betonski zid od 4 cm, 15 mm staklene vune i sadra debljine od 13 mm; 5 — zid od opeke 1/1, ožbukan; 6 — zid od opeke 1/2, ožbukan; 7 - šper-ploča od 1 cm

Prema *Göseleu* moguće je izgraditi jeftine kvazidvostruke pregrade s relativno velikim zvučnim prigušivanjem. To su obični zidovi od opeke ili betona kojima je dodana „lakša" strana od savitljivog materijala, kao što su ploče od drvenih vlakanaca, da bi se otežalo emitiranje zvuka. Između ploče i zida stavi se elastičan međusloj npr. od staklene vune. Iako je pri tome prijeko potrebno da se ploča pričvrsti izravno na zid, kao na sl. 6.32, ipak se u usporedbi s golim zidom postiže povećano zvučno prigušivanje od 8 do 10 dB. Taj se postupak pokazao valjanim i pri zvučnoj izolaciji avionskih kabina.

Princip dvostruke pregrade može se primijeniti ne samo na horizontalan nego i na vertikalan smjer. Tad se dobiva „kutija u kutiji". Dakako da u konstrukciji takve vrste nužno postoje „mostovi" za zvuk od poda unutarnje prema dnu vanjske „kutije". Ti mostovi treba da budu zvučno što manje provodni, dakle od elastičnog materijala kao što su pluto, guma i sl. Na tom mjestu mogu se upotrijebiti i čelične opruge.

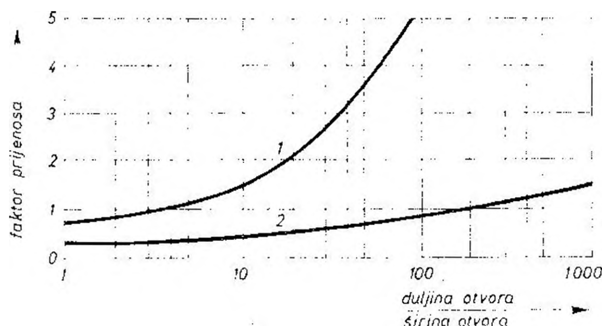


Sl. 6.32. Višeslojna pregrada prema Göseleu

6.5.5. Prolazak zvuka kroz male otvore

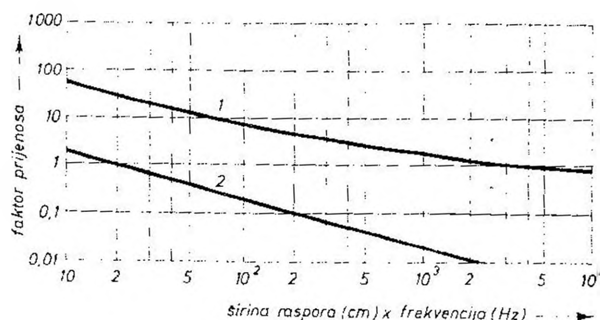
U građevinskoj akustici od većeg su praktičkog značenja samo oni otvori u pregradama kojima su dimenzije mnogo manje od valne duljine zvuka. To su npr. ključanice, raspori između vrata i vratnica, pukotine u zidovima itd. Efekt difrakcije otvora koji su približno okrugli može se zanemariti; gotovo cijela zvučna energija koja padne na otvor prođe na drugu stranu pregrade. Ako je u vratima površine 2 m² površina otvora ključanice 2 cm², odnos površine je 10000 : 1, što znači da najveće zvučno prigušivanje koje se kod takvih vrata može postići iznosi 40 dB.

U praksi su mnogo češći dugi i uski otvori. Kod njih je moguć i efekt difrakcije. Krivulje na sl. 6.33. vrijede za duge pravokutne otvore. Kroz takve otvore, što se vidi iz dijagrama, može proći i veća zvučna energija od one koja odgovara površini otvora. Iz tih se krivulja također zapaža kako prolazak zvuka vrlo mnogo ovisi o obliku otvora i o debljini pregrade.



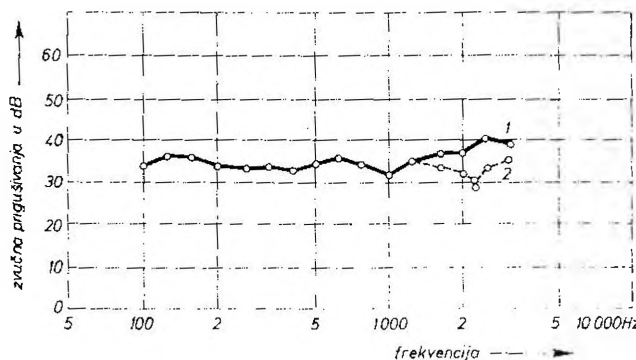
Sl. 6.33. Faktor prijenosa pravokutnog otvora ovisno o omjeru duljine otvora prema njegovoj širini. Krivulja 1 vrijedi za otvore u vrlo tankoj pregradi, a krivulja 2 onda kad omjer debljine pregrade prema drugom korijenu iz površine otvora iznosi 0,5.

Za raspore, dakle otvore u kojih je duljina velika prema valnoj duljini, vrijede krivulje na sl. 6.34. Donja se odnosi na raspore kakve susrećemo u praksi, i iz nje se vidi da je faktor prijenosa obično manji od jedan.



Sl. 6.34. Faktor prijenosa raspora ovisno o produktu širine raspora i frekvencije. Krivulja 1 vrijedi za vrlo malenu debljinu raspora, a krivulja 2 onda kad se debljina raspora prema njegovoj širini odnosi kao 20 : 1.

Ako je debljina pregrade jednaka cjelobrojnom višekratniku polovične duljine zvučnog vala, zvučna propusnost otvora ili raspora može biti mnogo veća od jedan. Veličina zvučne propusnosti ovisi tad o otporu trenja u otvoru ili rasporu. Iz krivulje na sl. 6.35. vidi se kako je okrugao otvor promjera od 1,7 cm u pregradi koja je debela 6 cm utjecao na zvučno prigušivanje. U području oko 2200 Hz ono se smanjilo za oko 10 dB. Na toj frekvenciji je debljina pregrade jednaka polovici valne duljine, pa je zvučna propusnost otvora velika.

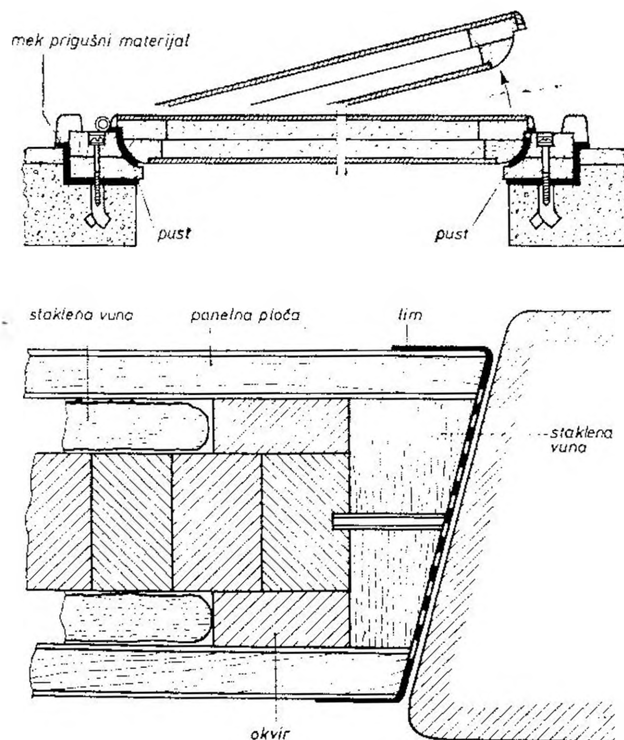


Sl. 6.35. 1 — frekvencijska karakteristika zvučnog prigušivanja neke pregrade debljine od 6 cm i 2 — ista pregrada s rupom promjera od 1,7 cm

6.5.6. Vrata i prozori

Zvučno prigušivanje vrata ovisi o njihovoj težini, ali vrlo mnogo i o tome kolik je razmak između vrata i dovratka, te o priljubljenosti dovratka uza zid. Za posebne svrhe grade se vrata velike težine sa specijalnom izvedbom dosjednih ploha. Ako se jednim vratima ne može postići potrebno zvučno prigušivanje, stavljaju se dvoja vrata među kojima se ostavlja razmak od nekoliko desetaka centimetara. Na sl. 6.36. presjek je dviju izvedbi vrata. Gornja su lakša, s dosjednom plohom obloženom pustom. Na donjim vratima primijenjen je poseban način prigušivanja

zvuka na dosjednoj plohi. Prostor u vratima prema dovratku ispunjen je staklenom vunom koja je pokrivena izbušenom pločom. Umjesto izbušene ploče može se upotrijebiti i tkanina. Iako ova vrate ne dosjedaju savršeno, zvuk se pri prolasku kroz raspor između vrata i dovratka priguši, pa je zvučno prigušivanje vrata kao cjeline veliko.



Sl. 6.36. Gornja slika: vrata specijalne izvedbe s velikim zvučnim prigušivanjem. Donja slika: vrata s velikim zvučnim prigušivanjem bez tijesnog prianjanja na dovratak

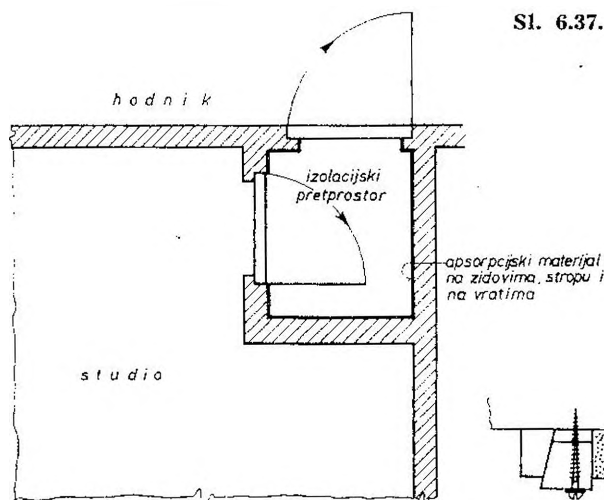
Dajemo pregled zvučnog prigušivanja za vrata različitih izvedbi (prema *Furreru*):

1. lagana obična vrata, debljina 2 cm, masa 6 kg/m^2	21 — 27 dB
2. normalna vrata, debljina 4 cm, masa 15 kg/m^2	25 — 29 dB
3. normalna vrata kao pod 2, s pustenim brtvilom	28 — 32 dB
4. dvostruka normalna vrata kao pod 2, s razmakom od 40 cm	30 — 36 dB
5. specijalna višeslojna vrata, s pustenim brtvilom, bez prolazne ključanice	36 — 40 dB
6. dvostruka specijalna vrata kao pod 5, s razmakom od 40 cm	50 dB

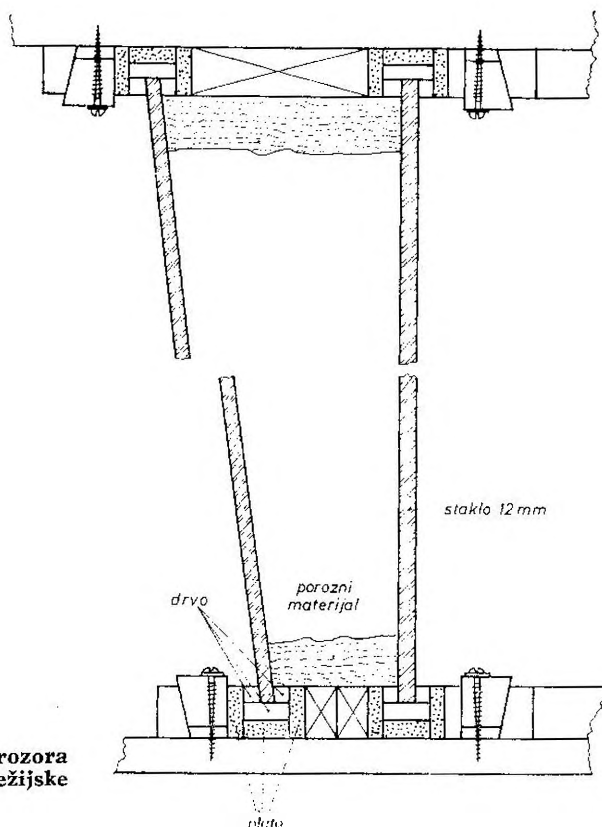
Veliko zvučno prigušivanje može se postići upotrebom dvostrukih jednostavnijih vrata ako ih razdvaja veći međuprostor, kao na sl. 6.37. Zvučno se prigušivanje još povećava ako se međuprostor ispuni apsorpcijskim materijalima.

Kao za vrata tako i za prozore zvučno prigušivanje ovisi o težini, u ovom slučaju stakla, o broju staklenih ploča, te o izvedbi dosjednih ploha. Kod običnih građevinskih prozora postižu se ova zvučna prigušivanja (prema *Furreru*):

1.	jednostavno ostakljenje, debljina stakla 3 — 4 mm	20 — 24 dB
2.	dvostruko ostakljenje, debljina stakla 3 — 4 mm	24 — 28 dB
3.	dvostruko ostakljenje, s brtvilom na dosjednim plohama, stakla 5 ÷ 7 mm	30 — 34 dB

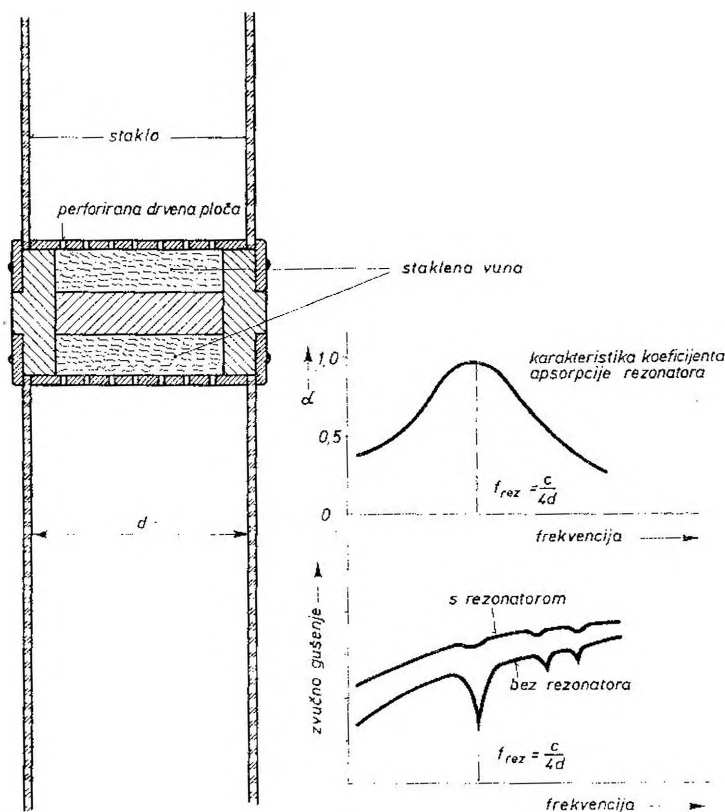


Sl. 6.37. Izolacijska pretprostorija



Sl. 6.38. Vertikalni presjek prozora kakav se ugrađuje između režijske prostorije i studija

Za specijalne svrhe, npr. u radio-studijima gdje je potrebno zvučno prigušivanje od 50 dB i više, za prozore se upotrebljavaju stakla od 20 mm, pa i deblja, s razmakom od oko 20 cm. Na tim se mjestima umjesto običnog stavlja kristalno staklo, kojemu su bolja optička, a i akustička svojstva jer mu je specifična masa veća. Na sl. 6.38. vidimo konstrukciju takva prozora koji se ugrađuje u zid između studija i režijske prostorije. Sl. 6.39. predočuje presjek prozora nešto jednostavnije izvedbe, ali s rezonantnim apsorberom na rubovima. Rezonantna frekvencija tog apsorbera ugođena je na onu kod prozora kao dvostruke pregrade, tako da je i za tu frekvenciju zvučno prigušivanje veliko.



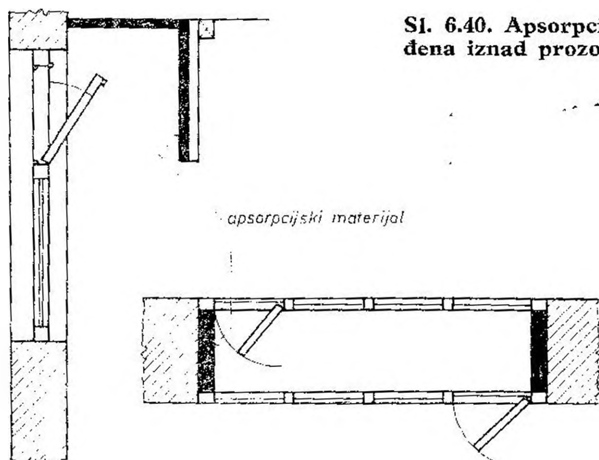
Sl. 6.39. Dvostruki režijski prozor s panelnim rezonatorom u okviru

Nezgodna strana običnih prozora s gornjim krilom je u tome što uz otvoreno krilo prodire u prostoriju ulična buka koja, odbijajući se od stropa, ima u prostoriji visoku razinu. Na jednostavan način buka se može prigušiti nadsvođenjem prozorskog krila apsorberom, kao na sl. 6.40.

Vrata i prozori najčešće imaju manju površinu i manje zvučno prigušivanje od zidova ili pregrada u koje su ugrađeni. Ti elementi, dakle, smanjuju zvučno

prigušivanje pregrade kao cjeline. Za rezultantno srednje zvučno prigušivanje vrijedi:

$$R_{rez} \approx R_2 + 10 \log \frac{S_0}{S_2} \text{ (dB)} \tag{6.12}$$



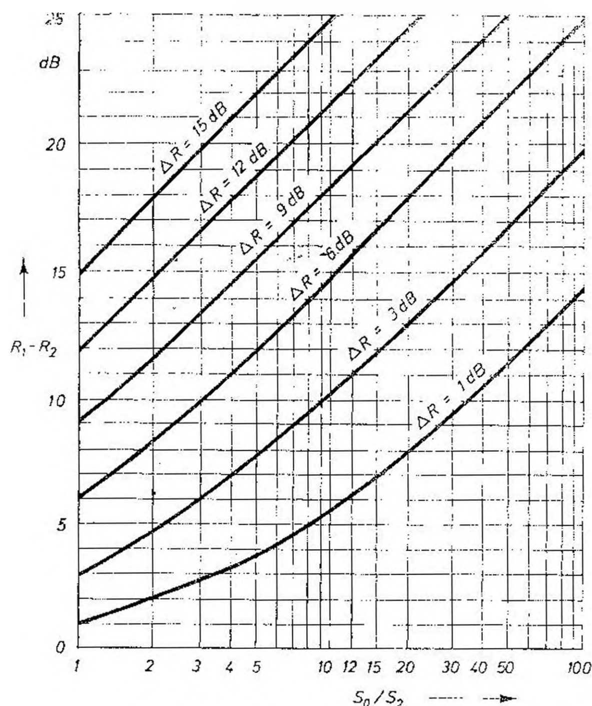
Sl. 6.40. Apsorpcijska konstrukcija dograđena iznad prozora ili u prozor

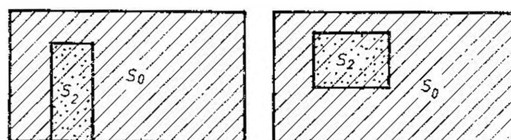
Tu je R_2 srednje zvučno prigušivanje vrata ili prozora, S_2 njihova je površina, a S_0 ukupna površina pregrade. Iz dijagrama na sl. 6.41. može se naći rezultantno srednje zvučno prigušivanje ako je poznat omjer površina S_0/S_2 i razlika zvučnih prigušivanja ($R_1 - R_2$), gdje je R_1 srednje zvučno prigušivanje zida koje bi on imao bez vrata ili prozora. Uzmimo jedan primjer. Neka zid ima površinu od 18 m^2 i srednje zvučno prigušivanje od 35 dB. U njega ugrađena vrata površine su od 2 m^2, uz srednje zvučno prigušivanje od 20 dB. Razlika ($R_1 - R_2$) iznosi 15 dB. Iz dijagrama se može otčitati da se zbog vrata srednje zvučno prigušivanje zida smanji za $\Delta R = 6$ dB. Prema tome rezultantno je srednje zvučno prigušivanje: $R_{rez} = 35 - 6 = 29$ dB.

Iz jednaždbe (6.12) izlazi da zvučno prigušivanje kombiniranih pregrada ovisi samo o veličini manjega zvučnog prigušivanja R_2 i o omjeru ploha S_0/S_2. To vrijedi i kad je ploha kojoj pripada manje zvučno prigušivanje otvor u zidu, pa je, dakle, $R_2 = 0$. Ako na otvor u zidu (npr. otvorena vrata) otpada 10% površine cijele pregrade, rezultantno će zvučno prigušivanje biti 10 dB. Međutim, takav proračun vrijedi samo onda kad su dimenzije otvora veće od duljine zvučnih valova jer zvučna propusnost malenih rupa i raspora može biti znatno veća od jedan (vidi dijagram na sl. 6.33).

6.5.7. Mjerenje zvučnog prigušivanja pregrade

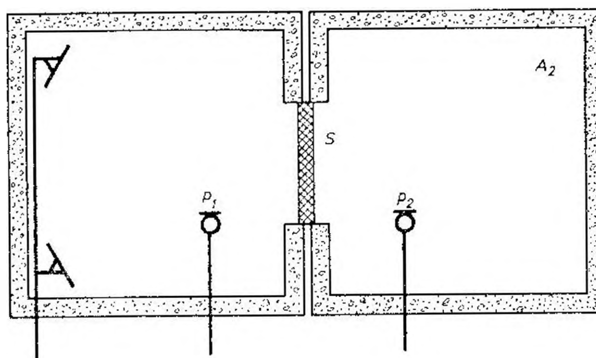
Kad se usavršavaju novi materijali za pregrade, ili nove pregradne konstrukcije, potrebno je unaprijed utvrditi kakve su njihove akustičke osobine. Mjerenje se izvodi u laboratoriju s *dvije odječne komore* (sl. 6.42). U zajedničkom zidu je otvor u koji se ugrađuje ispitivana konstrukcija. Laboratorij mora biti tako građen da zvuk proizveden u jednoj komori prolazi u drugu samo kroz ugrađenu pregradu. Zaobilazno provođenje zvuka valja, dakle, praktički sasvim onemogućiti.





Sl. 6.41. Dijagram za otčitavanje smanjenja zvučnog prigušivanja pregrada s različitim građevnim elementima

Prema ISO-preporukama (ISO/R 140—1960) veličinom komora treba osigurati dovoljno veliku difuznost zvučnog polja. Da bi se zadovoljio taj uvjet, pojedina komora ne smije biti manja od 50 m³, a po mogućnosti volumen treba da bude 100 m³. Ispitivana pregrada mora biti površine od 10 m², s time da kraća dimenzija nije manja od 2,5 m. Mjeri se pomoću frekvencijski moduliranog tona



Sl. 6.42. Shematski prikaz laboratorijskog mjerenja zvučnog prigušivanja pregradne konstrukcije

ili uskopojasnim šumom. Modulacijski razmah frekvencijski moduliranog tona treba da iznosi $\pm$ 10% (ispod 500 Hz $\pm$ 50 Hz), s modulacijskom frekvencijom od 6 Hz. Mjerne frekvencije su ove: 100, 125, 160, 200, 250, 320, 400, 500, 640, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3200 i 4000 Hz. Kad se mjeri pomoću tercnoga pojasnog šuma, navedene frekvencije su središnje tercne frekvencije. Srednja vrijednost zvučnog prigušivanja dobiva se kao aritmetička sredina zvučnih prigušivanja u frekvencijskom području između 100 i 3200 Hz ili između 125 i 4000 Hz.

Kao što je već prije izloženo (odjeljak 6.5.1), preporučuje se da se rezultati mjerenja na krajnjim frekvencijama unose s polovičnim vrijednostima. Uz takvu se korekciju srednje zvučno prigušivanje dobiva kao zbroj svih pojedinačnih prigušivanja podijeljen brojem mjernih frekvencija n smanjenim za jedan.

$$R = \frac{\frac{R_1}{2} + R_2 + R_3 + \ldots + \frac{R_n}{2}}{n - 1} \tag{6.13}$$

Kad se zvučno prigušivanje mjeri u stambenim prostorijama, dobivaju se niži rezultati od onih u laboratoriju jer zvuk i zaobilaznim putovima prelazi iz jedne prostorije u drugu. Srednje zvučno prigušivanje R odnosi se uvijek na određeni građevni element.

U komori u kojoj izvor emitira zvuk djeluje na plohe prostorije intenzitet zvuka I_1. Na pregradu površine S otpada zvučna snaga $P_1 = I_1 \cdot S$ ili, prema jednadžbi (1.19):

$$P_1 = \frac{p^2_1}{\varrho_0 c} \cdot S \tag{6.14}$$

Tu je p_1 efektivna vrijednost zvučnog tlaka u prostoriji u kojoj je izvor zvuka.

Zvučnu snagu P_2 koja kroz pregradu prođe u prijemnu prostoriju apsorbiraju njezine plohe. Ako sa A_2 označimo apsorpciju prostorije, dobiva se:

$$P_2 = \frac{p^2_2}{\varrho_0 c} \cdot A_2 \tag{6.15}$$

Omjer zvučne snage u prostoriji izvora prema zvučnoj snazi u prijemnoj prostoriji daje *stupanj zvučnog prigušivanja* r:

$$r = \frac{P_1}{P_2} \tag{6.16}$$

što daje:

$$r = \frac{p^2_1 S}{p^2_2 A_2} \tag{6.17}$$

ili u decibelima:

$$R = 10 \log r = 20 \log \frac{p^2_1}{p^2_2} + 10 \log \frac{S}{A_2} \tag{6.18}$$

Za razine zvučnih tlakova p_1 i p_2 možemo pisati:

$$L_1 = 20 \log \frac{p_1}{p_0} \tag{6.19}$$

$$L_2 = 20 \log \frac{p_2}{p_0} \tag{6.20}$$

Zvučno će prigušivanje prema tome biti:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A_2} \quad (6.21)$$

Označimo li razliku zvučnih razina sa D, izlazi:

$$R = D + 10 \log \frac{S}{A_2} \text{ (dB)} \quad (6.22)$$

Korektivni član $10 \log (S/A_2)$, koji se dodaje članu D u jednadžbi (6.22), rijetko premašuje 3 dB, i prema tome općenito neznatno utječe na vrijednost zvučnog prigušivanja R.

Mjerni rezultati zvučnog prigušivanja pregrade između dviju prostorija ne smiju biti ovisni o apsorpciji one koja je prijemna. Da bi se to postiglo, uzima se za prijemnu prostoriju referentna apsorpcija od 10 m², pa je *normirana razlika zvučnih razina*:

$$D_N = D + 10 \log \frac{10}{A_2} \text{ (dB)} \quad (6.23)$$

Podaci o apsorpciji prostorije dobivaju se mjereći vrijeme odjeka i izračunavajući prema Sabineovoj formuli: $A = 0{,}16\, V/T$. Stoga se po propisima u nekim zemljama normirana razlika zvučnih razina računa izravno uz pomoć vremena odjeka umjesto pomoću apsorpcije:

$$D_N = D + 10 \log \frac{T}{0{,}5} \text{ (dB)} \quad (6.24)$$

T je mjereno vrijeme odjeka prijemne prostorije, a 0,5 s je referentno vrijeme odjeka, jer je za većinu stambenih soba to tipična vrijednost.

Na sasvim jednak način kao što se to čini kad su prostorije susjedne može se mjeriti i u dvjema prostorijama između kojih je treća. No tad se dobiveni rezultat ne označuje kao zvučno prigušivanje R, već kao razlika zvučnih razina D.

Normirana razlika zvučnih razina D_N može poslužiti kao mjera prijenosa buke između prostorija bez obzira na to kako su one međusobno smještene*.

6.5.8. Osnovna pravila građevinske akustike

Svi osnovni principi na kojima se zasniva zvučno prigušivanje zidova, ili općenito pregrada, i sve osnovne mjere koje se poduzimaju da bi se postigla što bolja zvučna izolacija zidova (pregrada), naći ćemo u deset slijedećih pravila. Pravila su uzeta iz priručnika „*Elektroakustisches Taschenbuch*" *E. Rickmanna i H. Heyde* (1940).

1. Zvučno prigušivanje jednostavnih zidova ovisno je uglavnom o masi zida po m². Što je zid veće specifične mase, to je ono veće. Ovisnost zvučnog prigušivanja o masi zida po jedinici površine predočuje dijagram na sl. 6.21. Ono također raste s frekvencijom, što se vidi iz dijagrama na sl. 6.20.
2. Uz istu masu po m² veće zvučno prigušivanje ima onaj zid koji je krući prema savijanju. Upotreba cementne žbuke, u usporedbi s vapnenom žbukom ili sadrom, povisuje zvučno prigušivanje do 4 dB.

---

* Jugoslavenski propisi o zvučnoj zaštiti zgrada objavljeni su u *Službenom listu SFRJ* br. 35 od 13. VIII 1970. pod naslovom „*Pravilnik o tehničkim mjerama i uvjetima za zvučnu zaštitu zgrada*" (str. 992—997).

3. Zvučno prigušivanje jednostavnih zidova mnogo ovisi o kvaliteti izvedbe zida u vezi sa šupljikavošću.
4. Koliko će biti zvučno prigušivanje nekoga jednostavnog zida, ovisi o njegovu najpropusnijem dijelu. Uzaludno je izvesti zid prema svim pravilima za veliko zvučno prigušivanje ako npr. vrata u njemu ne prigušuju zvuk isto onako kao on sam. To vrijedi i za sve šupljine u zidu, te prolazne cijevi i grede.
5. Veličina zidne plohe ne utječe znatnije na zvučno prigušivanje.
6. Zvučno prigušivanje zidova građenih od više međusobno vezanih slojeva od različita materijala za 2 dB je veće nego što bi odgovaralo masi zida.
7. Zvučno prigušivanje višestrukih zidova uglavnom ovisi o masi po m^2, međusobnoj udaljenosti pojedinih zidova i o ispunjenju pravila 2. i 4. Ono je na rezonantnoj frekvenciji najmanje. Ispod te vrijednosti približava se ono u višestrukog zida iznosu za jednostavan zid.
8. Rezonantna frekvencija višestrukih zidova treba da je što niža kako bi se dobro prigušili šumovi i buka na nižim frekvencijama.
9. Stojne valove (poprečna titranja) višestrukih zidova valja u zračnom međuprostoru prigušiti apsorpcijskim materijalima.
10. Kod višestrukih zidova mora se paziti da između pojedinih zidova ne nastane veza preko „mostova", tj. preko komada žbuke, cijevi, krutih prigušnih sredstava itd.

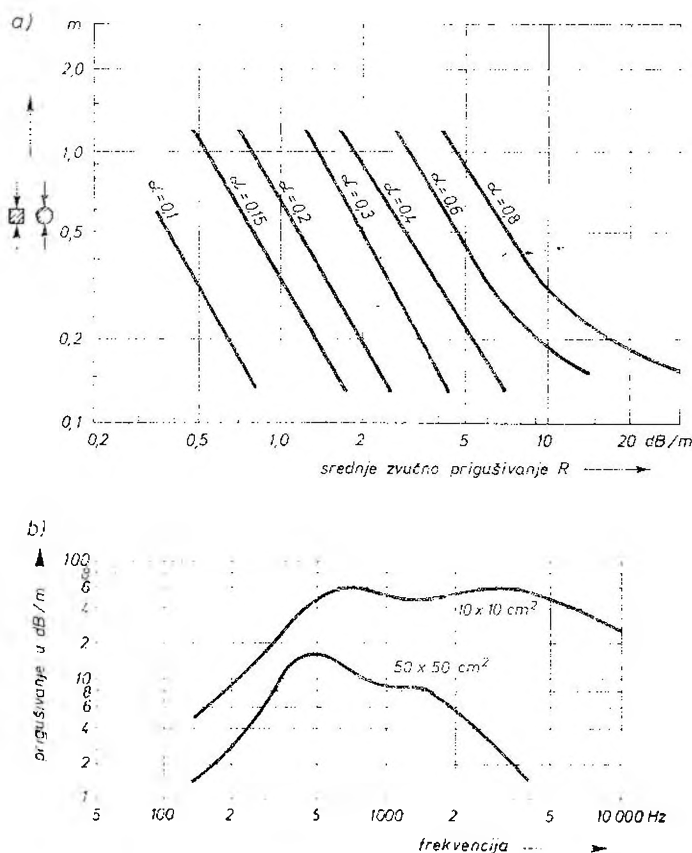
6.5.9. Prigušivanje u ventilacijskim kanalima

U ventilacijske i klimatizacijske uređaje jeftinije je ugraditi manji ventilator koji ima veći broj okretaja u minuti, pa prema tome stvara veću buku, i k tome u kanale dodati prigušne materijale, nego upotrijebiti polagan veliki ventilator s neprigušenim kanalima. Buku može uzrokovati i strujanje zraka u kanalu, a i treperenje stijenki kanala ako su građene od tankih ploča. Da bi se izbjegli zračni vrtlozi, ne rade se u kanalu oštra koljena i izbočine. I brzina zraka treba da je dovoljno malena: u glavnim kanalima do 5 m/s, a u sporednima do 3 m/s.

U zračnim kanalima obloženima apsorpcijskim materijalima prigušivanje zvuka ovisi o tri činioca:

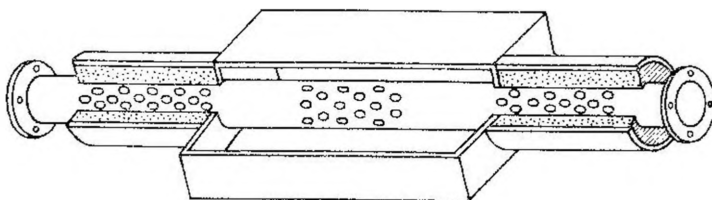
1. *Duljina kanala.* Prigušivanje zvuka izraženo u decibelima približno je proporcionalno duljini obloženog kanala. Na sl. 6.43.*a* može se iz dijagrama otčitati koliko je zvučno prigušivanje po metru u okruglim i kvadratičnim kanalima pri različitim koeficijentima apsorpcije.
2. *Oblik presjeka kanala.* U okruglim i kvadratičnim kanalima prigušivanje je manje nego u onima kojima je presjek u obliku izduženoga pravokutnika.
3. *Koeficijent apsorpcije materijala kojim je kanal obložen.* Na sl. 6.43.*b* vidi se kako prigušivanje zvuka po metru duljine kanala ovisi o frekvenciji, i to u dva kanala kvadratična presjeka različite veličine.

Ako se oblaže staklenom ili mineralnom vunom, taj se materijal pokriva perforiranim pločama da se spriječi odnošenje čestica materijala zračnom strujom. Debljina sloja apsorpcijskog materijala mora biti barem 3 cm kako bi se apsorbirale i niže frekvencije buke.



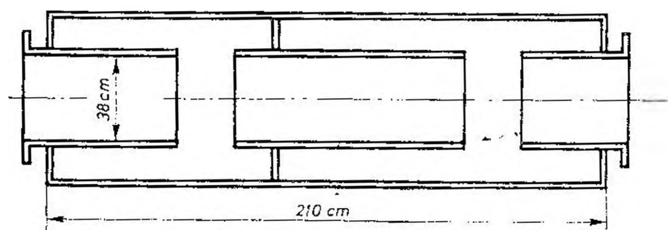
Sl. 6.43. a) Zvučno prigušivanje po metru duljine ventilacijskog kanala. Uz krivulje je naznačena vrijednost koeficijenta apsorpcije materijala kojim je kanal iznutra obložen. b) Frekvencijske karakteristike dvaju kanala različitih presjeka obloženih apsorpcijskim materijalom

U buci može usko područje frekvencija biti po intenzitetu naročito istaknuto. Tad vrlo uspješno djeluje *akustički pojasni filtar* prikazan na sl. 6.44. Sasvim niske frekvencije nije moguće efikasno prigušiti poroznim apsorpcijskim materijalima.



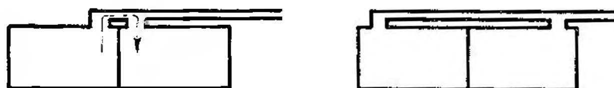
Sl. 6.44. Akustički pojasno-zaporni filtar. Kanal ima promjer od 10 cm.

Stoga se u kritičnim slučajevima u kanale ugrađuju *akustički niskopropusni filtri* kojima se postiže veliko prigušivanje iznad stanovitoga frekvencijskog područja (sl. 6.45).



Sl. 6.45. Filtarski član za velike dizelske motore

Dovodni kanali u dvije susjedne prostorije mogu ih akustički povezati. Ta se veza može znatno oslabiti udalje li se međusobno ulazni otvori kao na sl. 6.46.



Sl. 6.46. Prijelaz zvuka iz prostorije u prostoriju kroz ventilacijske kanale: lijevo su otvori neispravno, a desno su ispravno smješteni.

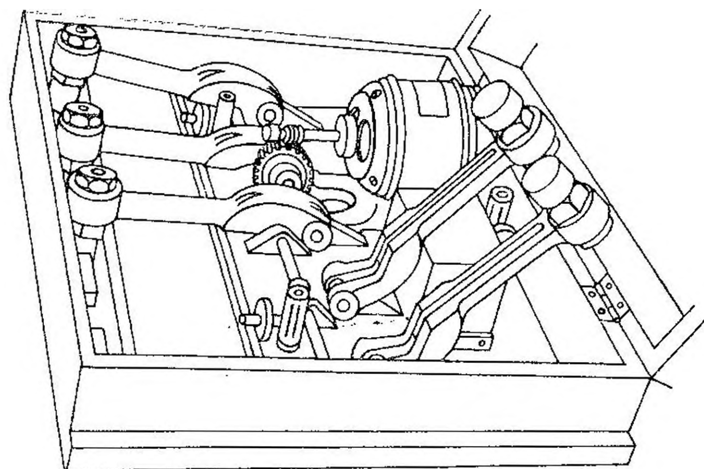
6.5.10. Mjerenje zvučne izolacije stropne pregrade

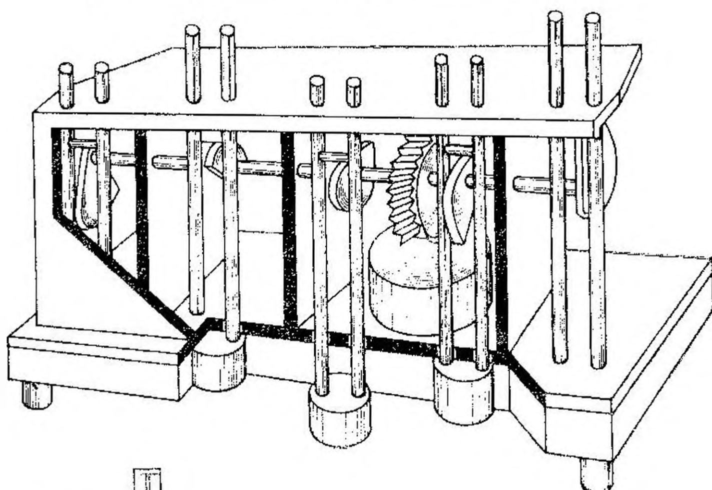
Preko stropa stambenih prostorija prodire buka koja u gornjim prostorijama nastaje vibriranjem poda zbog trčanja, guranja pokućstva, rada kućanskih aparata itd. Za mjerne svrhe valjalo je izvor mehaničke pobude normirati. To je učinjeno time što su propisane osnovne karakteristike *stroja s batićima** koji udaraju o pod (sl. 6.47). Prema ISO-preporuci (ISO/R 140 — 1960) za takav uređaj vrijede ovi propisi:

Stroj ima pet batića poredanih u ravnoj liniji s jednakim međusobnim razmakom na duljini od 40 cm. Pojedini udarci slijede jedan za drugim u jednakim vremenskim razmacima od 100 ± 5 ms. Masa pojedinog batića je 500 g (± 2,5%). Visina pada svakog batića na ravan pod odgovara slobodnom padu s visine od 4 cm (± 2,5%). Glave batića kojima oni udaraju o pod kružnog su oblika i promjera od 3 cm. Batići su od mjedi ili čelika, s donjom površinom kuglasta oblika koja ima radijus zakrivljenosti oko 50 cm. Kad je gornji sloj poda od lomljiva materijala, može se na batiće nalijepiti gumeni sloj debeo 5 mm. Sl. 6.48. prikazuje način kako se mjeri *razina udarne buke.*

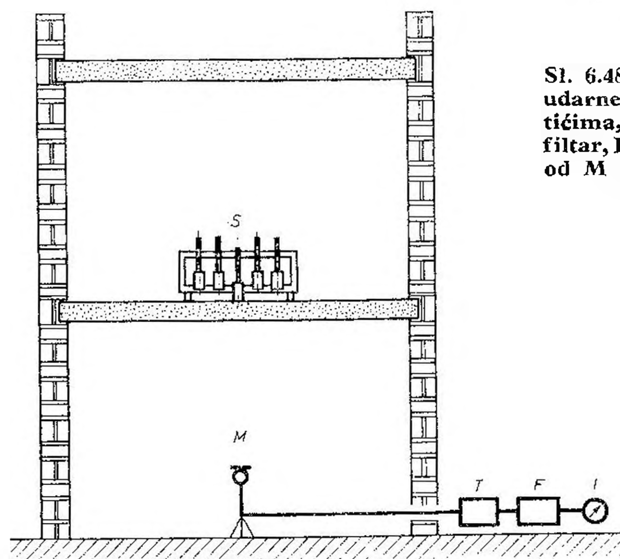
---

* Takav stroj proizvodi buku koja je vrlo slična brzom konjskom topotu, pa mu po tome naziv i *topotni stroj.*





Sl. 6.47. Dvije izvedbe strojeva s batićima za mjerenje zvučne propusnosti stropa



Sl. 6.48. Shematski prikaz mjerenja udarne stropne buke. S je stroj s batićima, M mikrofon, T pojačalo, F filtar, I pokazni instrument. Elementi od M do I čine zvukomjer.

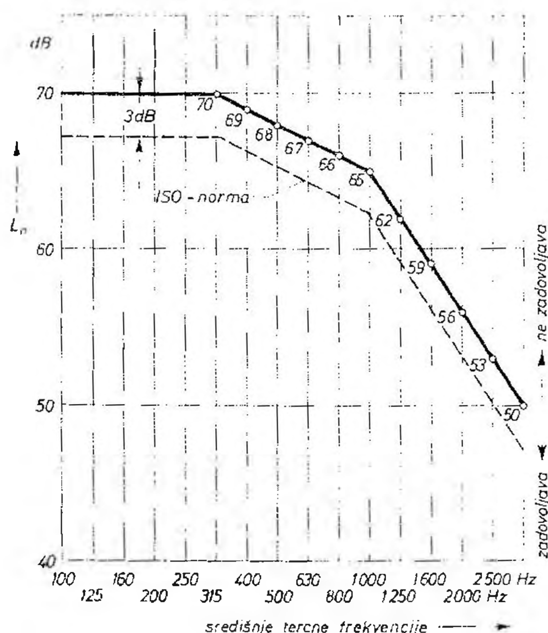
Razinom udarne buke naziva se oktavna zvučna razina, izmjerena u donjoj prostoriji. Izražavanje zvučnom razinom po oktavi zadržano je zato što se je u prvo vrijeme mjerilo pomoću oktavnih filtara. Iako se danas ponajviše mjerenje izvodi tercnim (ili poluoktavnim) filtrima, preračunavaju se tercne (ili poluoktavne) zvučne razine u oktavne kako bi bila moguća usporedba sa starijim mjernim rezultatima. Oktavne zvučne razine dobivaju se dodavanjem poluoktavnim razinama 3 dB, a tercnima 5 dB.

Utjecaj zvučne apsorpcije u prijemnoj prostoriji uzima se u obzir na taj način da se razina udarne buke L_t preračuna u *normiranu razinu udarne buke* L_n:

$$L_n = L_t - 10 \log \frac{10}{A} \tag{6.25}$$

A je apsorpcija prijemne prostorije u m², a 10 (m²) je referentna apsorpcija.

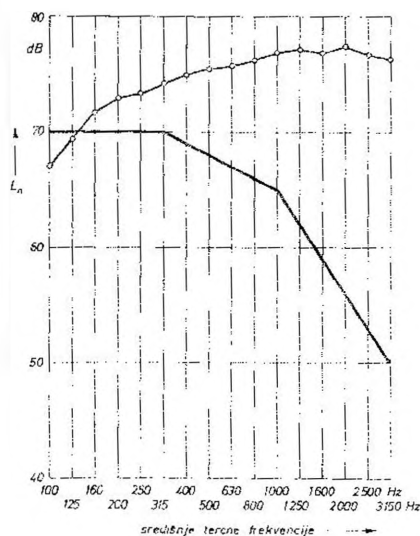
Kao što ima potrebe da se vrijednost zvučne izolacije pregrade izrazi jednim brojem, tako to isto vrijedi i za stropnu zvučnu izolaciju. Dobivanje podatka o stropnoj zvučnoj izolaciji temelji se na upotrebi krivulje koja je prikazana na sl. 6.49. Suprotno krivulji koja vrijedi za vertikalne pregrade i daje standardno *prigušivanje*, krivulja na sl. 6.49. daje standardnu *propusnost* stropa. Prema tome su odstupanja od krivulje naviše nepovoljna, a ona naniže povoljna odstupanja.



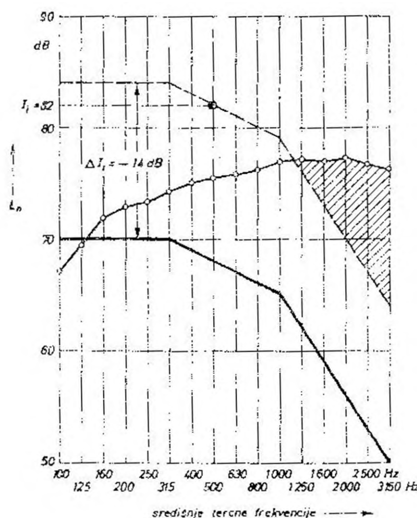
Sl. 6.49. Standardna krivulja za propuštenu razinu normirane udarne buke. ISO-krivuljama postavljaju se zahtjevi stroži za 3 dB.

Standardna krivulja na sl. 6.49. jest idealizirana krivulja zvučne propusnosti betonskog stropa od 120 mm na koji je položen drveni pod. Može se napomenuti da ta krivulja nema idealan frekvencijski tok. Odstupanja naviše na niskim frekvencijama smetaju u donjoj prostoriji više nego isto tolika odstupanja na visokim frekvencijama. To je razlog da neki autori ne preporučuju primjenu pravila „8 dB". Takvo se odstupanje u većini pojavljuje na visokim frekvencijama, pa bi primjenom pravila bilo dodatno još više naglašeno ono što suviše naglašava i sama krivulja.

Stropna zvučna izolacija određuje se postupkom sasvim sličnim onome kojim se dobiva iznos zvučne izolacije pregrade. U tablici 6.5, 2. stupac, i u dijagramu na sl. 6.50. iznesen je primjer s mjernim rezultatima po tercama. Pri izračunavanju uzeto je kao da povoljnih odstupanja nema, tj. kao da vrijednosti leže na krivulji pa su jednake nuli. Srednje nepovoljno odstupanje iznosi 9,8 dB. Budući da je veće od 2 dB, valja krivulju pomaknuti naviše. Potrebni pomak za cijeli broj decibela dobiva se pokusom, i u ovom slučaju on iznosi 14 dB (6. stupac i sl. 6.51). Time se dobiva srednje nepovoljno odstupanje od 1,88 dB, što je veće od 1 dB, a manje od 2 dB, pa zadovoljava. Stropna zvučna izolacija ima, dakle, vrijednost od — 14 dB ili: $\Delta I_i = -14$ dB.



Sl. 6.50. Primjer frekvencijske karakteristike što je ima razina propuštene normirane udarne buke. Krivulja je gotovo u cijelosti iznad standardne krivulje, što znači da je zvučna propusnost stropne konstrukcije nedopustivo velika



Sl. 6.51. Uz pomak standardne krivulje naviše dobiva se da vrijednost stropne zvučne izolacije u vezi s krivuljom na sl. 6.50. iznosi — 14 dB.

Indeksom stropne zvučne izolacije I_i naziva se vrijednost na pomaknutoj krivulji koju ona ima na frekvenciji od 500 Hz. Iz dijagrama na sl. 6.51. može se očitati za tu vrijednost 82 dB. Što je indeks stropne zvučne izolacije manji, izolacija od buke donje prostorije prema gornjoj je bolja.

Prema njemačkim se normama stropna zvučna izolacija izražava iznosom *„udarno-zvučne zaštitne mjere"* *(Trittschallschutzmass — TSM)*, za koju približno vrijedi:

$$TSM \approx 68 - I_i \text{ (dB)} \tag{6.26}$$

Središnje terene frekvencije Hz	Normirana razina udarne buke dB	Vrijednosti standardne krivulje dB
1	2	3
100	67,0	70
125	69,5	70
160	71,8	70
200	72,9	70
250	73,3	70
315	74,2	70
400	75,0	69
500	75,5	68
630	75,7	67
800	76,2	66
1000	76,9	65
1250	77,1	62
1600	76,9	59
2000	77,3	56
2500	76,7	53
3150	76,3	50

Zbroj nepovoljnih odstupanja

$$\frac{\text{Zbroj nepovoljnih odstupanja}}{15}$$

Tablica 6.5.

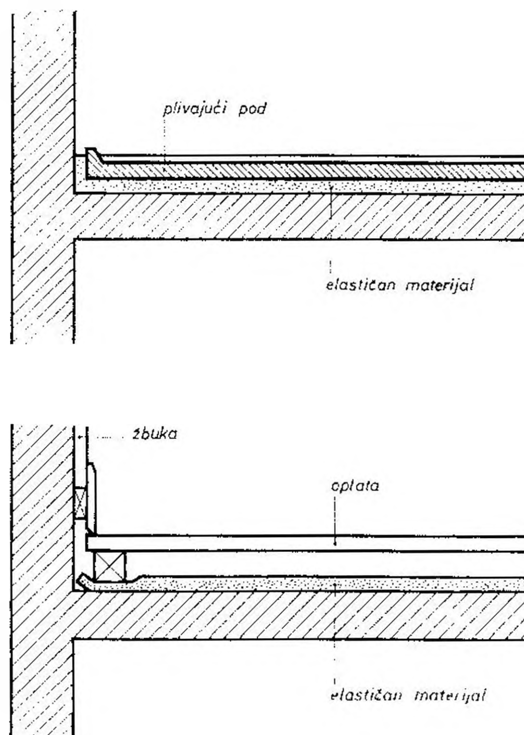
Odstupanja od standardne krivulje dB	Nepovoljna odstupanja od standardne krivulje dB	Vrijednosti standardne krivulje podignute za 14 dB dB	Nepovoljna odstupanja od podignute standardne krivulje dB
4	5	6	7
− 3,0	0	84	0
− 0,5	0	84	0
+ 1,8	1,8	84	0
+ 2,9	2,9	84	0
+ 3,3	3,3	84	0
+ 4,2	4,2	84	0
+ 6,0	6,0	83	0
+ 7,5	7,5	82	0
+ 8,7	8,7	81	0
+ 10,2	10,2	80	0
+ 11,9	11,9	79	0
+ 15,1	15,1	76	1,1
+ 17,9	17,9	73	3,9
+ 21,3	21,3	70	7,3
+ 23,7	23,7	67	9,7
+ 26,3	13,2	64	$6{,}2 \approx \left(\frac{76{,}3-64{,}0}{2}\right)$
	147,7	—	28,2
	9,8		1,96

U tablici 6.6. čujnost je buke u donjoj prostoriji kad se u gornjoj hoda ili se premješta pokućstvo, i to uz različite vrijednosti stropne zvučne izolacije.

Tablica 6.6.

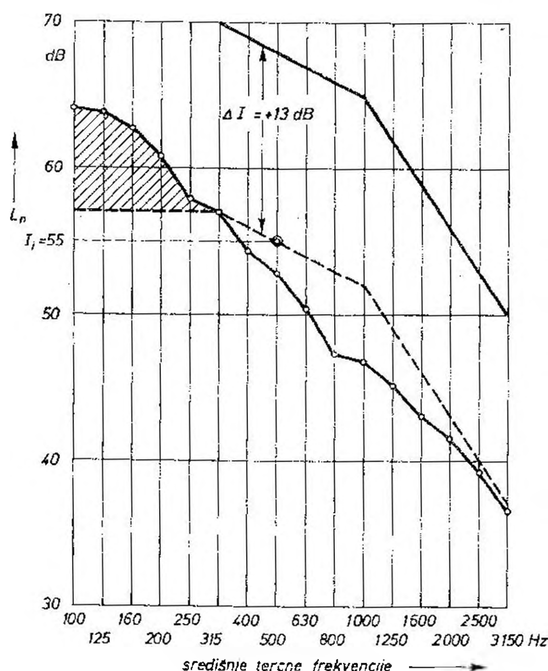
Stropna zvučna izolacija ΔI_i dB	Hodanje	Premještanje pokućstva
−20	jako čujno	vrlo jako čujno
−10	jako čujno	jako čujno
0	čujno	jako čujno
+10	slabo čujno	čujno
+20	nečujno	slabo čujno

Kao što se vidi iz tablice 6.6, stropna zvučna izolacija od — 14 dB ne zadovoljava. Razina udarne buke može se znatno smanjiti ako se između stropne ploče i poda stavi jedan ili više slojeva od elastičnog materijala. Tako dobiveni „plivajući pod" (sl. 6.52) ima osobito veliko prigušivanje na višim frekvencijama. U tablici 6.7. u 3. stupcu navedeno je smanjenje udarne buke što ga unosi jedna od izvedbi



Sl. 6.52. Dva tipa plivajućeg poda na betonskoj podnoj konstrukciji

plivajućeg poda. Stavljajući takav pod na stropnu ploču koja ima karakteristiku normirane razine udarne buke prikazanu na sl. 6.50, dobiva se mnogo niža normirana razina udarne buke pa je cijela karakteristika ispod standardne krivulje (sl. 6.53). Spusti li se standardna krivulja za 13 dB, zadovoljava se uvjet da srednje nepovoljno odstupanje bude između 1 i 2 dB, pa prema tome stropna zvučna izolacija ima vrijednost od + 13 dB. Takva vrijednost stropne zvučne izolacije ΔI_i, kao što izlazi prema tablici 6.6, zadovoljava.



Sl. 6.53. Frekvencijska karakteristika razine propuštene normirane udarne buke bitno je nakon postavljanja plivajućeg poda promijenila svoj tok pa je vrijednost stropne zvučne izolacije porasla na + 13 dB.

Iz dijagrama na sl. 6.53. može se otčitati da *indeks stropne zvučne izolacije* I_i ima vrijednost od 55 dB, što je znatno povoljnije nego bez plivajućeg poda.

6.6. VIBRACIJE

Prigušivši vibracije strojeva u nekoj tvornici može se znatno smanjiti buka i spriječiti titranje poda, koje neugodno djeluje na ljude i onemogućuje da ispravno funkcioniraju osjetljivi instrumenti.

Vibracije (ako su vertikalna smjera) prigušuju se oprugama ili elastičnim podlogama od gume, pluta i sličnog materijala. Pri tome stroj zajedno s elastičnom podlo-

T

Središnje terene frekvencije Hz	Normirana razina udarne buke bez plivajućeg poda dB	Smanjenje udarne buke zbog plivajućeg poda dB	Normirana razina udarne buke s plivajućim podom dB
1	2	3	4
100	67,0	3,0	64,0
125	69,5	5,6	63,9
160	71,8	9,0	62,8
200	72,9	12,1	60,8
250	73,3	15,4	57,9
315	74,2	17,2	57,0
400	75,0	20,6	54,4
500	75,5	22,6	52,9
630	75,7	25,3	50,4
800	76,2	28,8	47,4
1 000	76,9	30,0	46,9
1 250	77,1	32,0	45,1
1 600	76,9	33,9	43,0
2 000	77,3	35,7	41,6
2 500	76,7	37,5	39,2
3 150	76,3	39,8	36,5

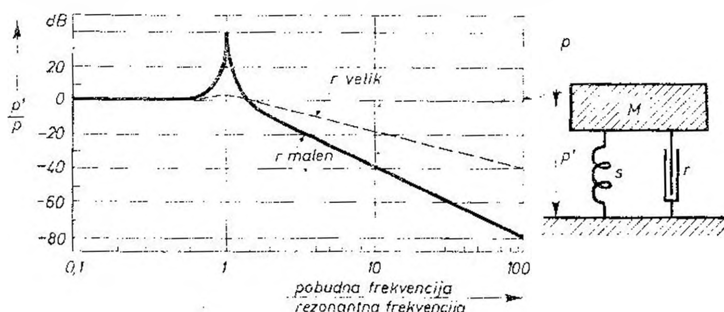
Zbroj svih odstupanja

$\frac{\text{Zbroj svih odstupanja}}{15}$

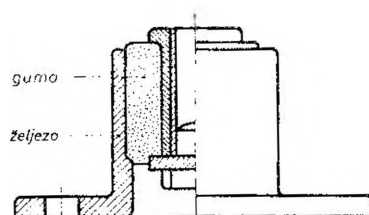
ablica 6.7.

Vrijednosti standardne krivulje dB	Odstupanja od standardne krivulje dB	Vrijednosti standardne krivulje spuštene za 13 dB dB	Nepovoljna odstupanja od spuštene standardne krivulje dB
5	6	7	8
70,0	— 6,0	57,0	$3{,}5 = \left(\frac{64{,}0 - 57{,}0}{2}\right)$
70,0	— 6,1	57,0	6,9
70,0	— 7,2	57,0	5,8
70,0	— 9,2	57,0	3,8
70,0	— 12,1	57,0	0,9
70,0	— 13,0	57,0	0
69,0	— 14,6	56,0	0
68,0	— 15,1	55,0	0
67,0	— 16,6	54,0	0
66,0	— 18,6	53,0	0
65,0	— 18,1	51,0	0
62,0	— 16,9	49,0	0
59,0	— 16,0	46,0	0
56,0	— 14,4	43,0	0
53,0	— 13,8	40,0	0
50,0	— 13,5	37,0	0
			20,9
			1,4

gom postane hotimični titrajni sistem. Važno je da njegova rezonantna frekvencija bude barem dva puta niža od najniže frekvencije koju sadrže vibracije. Iz dijagrama na sl. 6.54. vidi se kako je sila koja se prenosi na pod to manja što je veći odnos frekvencije vibracija prema rezonantnoj frekvenciji titrajnog sistema. Sl. 6.55. donosi presjek izolatora protiv vibracija kakav se može upotrijebiti za male motore.



Sl. 6.54. Krivulja prigušivanja jednostavnog titrajnog sustava



Sl. 6.55. Protuvibracijski izolator za male motore

Izoliranje od vibracija koje nastaju udarom posebno je težak problem. Takve vibracije uzokuju npr. čekići za kovanje velikih čeličnih blokova. Pri kovanju se gibanje čekića brzo zaustavlja na vrlo kratkom putu pa se velik dio energije prenosi i na potporni blok nakovnja. Izolator od udarnih vibracija mora imati određeni kapacitet za pohranjivanje te energije. Takav se izolator sastoji od inertnog, npr. betonskog bloka na koji se pričvrsti nakovanj, i elastičnog ovjesa (od jakih lisnatih ili spiralnih pera) koji nosi blok. Na taj se način postiže da se najveći dio suvišne udarne energije potroši u samom izolatorskom sustavu.

Također u tehnici vibracija se razine izražavaju u decibelima, dakle kao dvadesetorostruki logaritam odnosa određene veličine prema njezinoj referentnoj vrijednosti. Referentna ili nulta razina za pomak je $s_0 = 10^{-11}$ m, za titrajnu brzinu $v_0 = 10$ nm/s $= 10^{-8}$ m/s, a za akceleraciju $a_0 = 10$ μm/s$^2 = 10^{-5}$ m/s^2 (također $a_0 = 1$ $g_n = 9{,}81$ m/s^2).

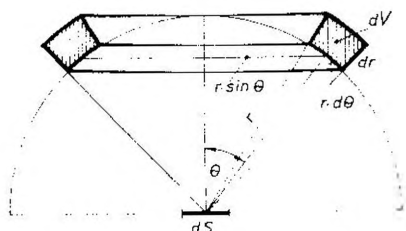
Prilozi

Prilog 1

IZVOD FORMULE ZA STRUJU ZVUČNE ENERGIJE KROZ JEDINICU POVRŠINE

Izvest ćemo izraz za zvučnu energiju koja padne na jedinicu zidne površine. Na sl. P.1.1. sa dS je označen element površine zida, a dV je element volumena sredine koji je na udaljenosti r od dS. Spojnica r zatvara s okomicom na dS kut Θ. Pretpostavit ćemo da je gustoća zvučne energije jednaka u cijelom području i označit ćemo je sa E. Prema tome će volumen dV sadržavati zvučnu energiju $E \cdot dV$. Površina dS vidi se sa dV pod prostornim kutom $d\Omega$. Za taj prostorni kut vrijedi izraz:

$$d\Omega = \frac{\cos\Theta \cdot dS}{r^2}$$



Sl. P. 1.1.

Uz pretpostavku da iz dV energija struji jednoliko u svim smjerovima, prispijeva na površinu dS količina energije $E \cdot dV \cdot \cos\Theta \cdot dS/(4\pi r^2)$. Svi elementi prostora koji na udaljenosti r, u odnosu prema okomici na dS, leže pod kutom Θ, čine torus presjeka $r.d\Theta \cdot dr$ i opsega $2\pi \cdot r \cdot \sin\Theta$. Za taj elementarni volumen vrijedi:

$$dV = 2\pi r \sin\Theta \, r \, d\Theta \, dr$$

Od volumena pada na dS energija:

$$E \frac{\cos\Theta \, dS}{4\pi r^2} \cdot 2\pi r^2 \sin\Theta \, d\Theta \, dr = \frac{E}{2} \sin\Theta \cos\Theta \, d\Theta \, dr \, dS$$

Ukupna energija koju u vremenu dt dobiva dS potječe od hemisfere s polumjerom cdt, gdje je c brzina širenja zvuka:

$$E_{tot} = \frac{E}{2} dS \int_0^{cdt} dr \int_0^{\pi/2} \sin\Theta \cos\Theta \, d\Theta = \frac{Ec}{4} dS \, dt$$

Prema tome na jedan m^2 dolazi u jednoj sekundi energija:

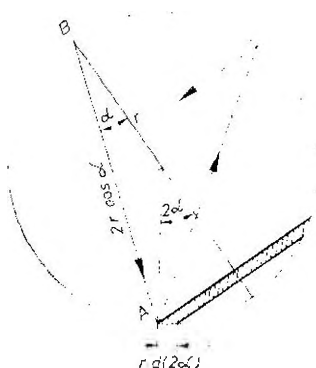
$$I = \frac{Ec}{4}$$

Prilog 2

IZVOD FORMULE ZA SREDNJI SLOBODNI PUT

Svjetlost koja dolazi s bilo kojeg elementa savršeno glatke unutarnje površine šuplje kugle, osvjetljuje svaki element površine jednakim intenzitetom *(Ulbrichtova kugla)*. Posve je slično s raspodjelom zvuka unutar kugle. Izvest ćemo najprije formulu za duljinu srednjega slobodnog puta u takvu specijalnom slučaju.

Pretpostavit ćemo da unutarnja površina kugle savršeno reflektira zvuk. Svaka zvučna zraka (sl. P.2.1.) koja iz izvora smještenoga u točki B polazi (u odnosu prema dijametru) pod kutom α, zatvara poslije refleksije u točki A s dijametrom povučenim kroz tu točku također kut α. To se ponavlja prilikom svake refleksije. Duljina zrake između dvije refleksije ostaje uvijek jednaka. Ako, dakle, nađemo srednju duljinu svih zraka koje izlaze iz točke B, dobit ćemo *srednji slobodni put*.



Sl. P. 2.1.

Neka se zvuk emitira prema Lambertovu zakonu kosinusa. Pri tome je količina direktnog zvuka po jedinici površine jednaka na svim dijelovima sferne stijene. Broj zvučnih zraka koje dolaze iz B pod kutom α razmjeran je prstenastoj površini $2\pi\, r \sin 2\,\alpha\, r\, d\,(2\,\alpha)$. Pomnožimo li to duljinom pojedine zrake $2r \cos \alpha$, dobivamo $16\,\pi\, r^3 \sin \alpha \cos^2 \alpha\, d\,\alpha$. Mijenjanjem kuta α od 0 do $\pi/2$ i dijeljenjem sa $4\pi\, r^2$, dobiva se srednji slobodni put zvučnih zraka, koje polaze iz točke B:

$$l = \int_0^{\pi/2} \frac{16\,\pi\, r^3 \sin \alpha \cos^2 \alpha\, d\,\alpha}{4\pi\, r^2} = \frac{16/3\,\pi\, r^3}{4\,\pi\, r^2} = \frac{4\,V}{S}$$

Formula za srednji slobodni put može se izvesti i na općenitiji način, primjenom kinetičke teorije plinova. Prije smo izveli da uz pretpostavku jednolike raspodjele zvučne energije u prostoru na svaki m^2 površine u jednoj sekundi dolazi energija $Ec/4$. Ako u svakom m^3 prostora ima n čestica plina, može se istim načinom dokazati da kroz plohu od 1 m^2 prolazi u jednoj sekundi $nc/4$ čestica plina. Prema tome, kroz površinu S prolazi u sekundi $ncS/4$ čestica. Pretpostavit ćemo da se one gibaju pravocrtno i međusobno se ne sudaraju, a i to da srednji put od pojedine čestice do površine koja zatvara neki hipotetički volumen V, ima duljinu l. Ako se čestice gibaju brzinom c, onda svaka ostaje u volumenu V za vrijeme od l/c sekunda. Mno-

žeći broj čestica koje prolaze kroz obujmnu plohu volumena V sa srednjim vremenom zadržavanja u volumenu, dobiva se ukupan broj čestica koje se nalaze u volumenu:

$$\frac{ncS}{4} \cdot \frac{l}{c} = Vn$$

odakle je:

$$l = \frac{4V}{S}.$$

Uz dovoljno velik broj refleksija ta formula je opća formula za srednji slobodni put. U posebnom slučaju, kad je srednja udaljenost od izvora do stijene jednaka približno l, ista formula vrijedi i onda kad je broj refleksija malen. Jedan od takvih prostora je unutarnji volumen kugle, koji smo u početku uzeli u razmatranje.

Prilog 3

IZVOD FORMULE ZA VRIJEME ODJEKA POLAZEĆI OD APSORPCIJE ATMOSFERE

U *Prilogu* 1 izveli smo formulu za količinu energije koja prispijeva u jedno sekundi na jedinicu površine stijene:

$$I = \frac{Ec}{4}$$

Ako sa $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \ldots$ označimo koeficijente apsorpcije površina $S_1, S_2, S_3, \ldots$ neke prostorije, onda će ukupna apsorbirana energija biti:

$$\frac{Ec}{4}(\alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \alpha_3 S_3 + \ldots)$$

Označit ćemo ukupnu apsorpciju sa A:

$$A = \Sigma \alpha_i S_i$$

tako da će apsorbirana energija biti:

$$\frac{Ec\,A}{4}$$

Možemo li pretpostaviti da se energija E za vrijeme dozvuka i odjeka mijenja u tako malim skokovima da je možemo smatrati kontinuiranom, onda je veličina promjene ukupne zvučne energije u prostoriji izražena sa VdE/dt. Zbroj apsorbirane zvučne energije i iznosa zvučne energije, kojim se ona povećava u prostoriji, daje ukupnu emitiranu energiju P:

$$V\frac{dE}{dt} + \frac{Ec\,A}{4} = P$$

Uz pretpostavku da je izvor zvuka počeo emitirati u trenutku $t = 0$, za rješenje diferencijalne jednadžbe dobiva se:

$$E = \frac{4P}{cA}\left(1 - e^{-\frac{cA}{4V}t}\right)$$

U času ukapčanja (tj. uz $t = 0$) gustoća je zvučne energije $E = 0$. Nakon dovoljno velikog t postaje drugi član u zagradi zanemarivo malen. To je primjer stacionarnog stanja, kad je gustoća zvučne energije:

$$E_0 = \frac{4P}{cA}$$

Od momenta iskapčanja zvučnog izvora bit će emitirana snaga $P = 0$, pa se kao rješenje dobiva:

$$E = \frac{4P}{cA} e^{-\frac{cA}{4V}t} = E_0 e^{-\frac{cA}{4V}t}$$

Prema Sabineovoj definiciji vrijeme odjeka T je ono vrijeme za koje gustoća zvučne energije padne na 10^{-6}-ti dio, dakle:

$$\frac{E}{E_0} = 10^{-6} = e^{-\frac{cA}{4V}T}$$

Odatle je:

$$T = \frac{4V}{cA} \ln 10^6 = \frac{0{,}161\, V}{A}$$

Kako prema Eyringu vrijedi da je $A = -S \ln(1 - \alpha)$, jednadžba koja prikazuje opadanje gustoće zvučne energije za vrijeme odjeka dobiva oblik:

$$E = E_0\, e^{\frac{c S \ln(1-\alpha)}{4V}}$$

Na višim zvučnim frekvencijama treba unijeti i prigušivanje zvuka prilikom širenja kroz sredinu (u praksi kroz zrak). Ako sa m označimo koeficijent prigušivanja po jedinici duljine puta, onda za put x vrijedi:

$$E = E_0\, e^{-mx}$$

Za vrijeme t zvučni val prevali udaljenost $x = ct$, što, kad se uvrsti u jednadžbu daje:

$$E = E_0\, e^{-mct}$$

Zbog apsorpcije ploha u prostoriji i apsorpcije sredine, gustoća zvučne energije opada prema jednadžbi:

$$E = E_0\, e^{\left(\frac{S \ln(1-\alpha)}{4V} - m\right) ct}$$

Rješavajući po $t = T$, uz $E/E_0 = 10^{-6}$, dobiva se:

$$T = \frac{0{,}161\, V}{4m\, V - S \ln(1 - \alpha)}$$

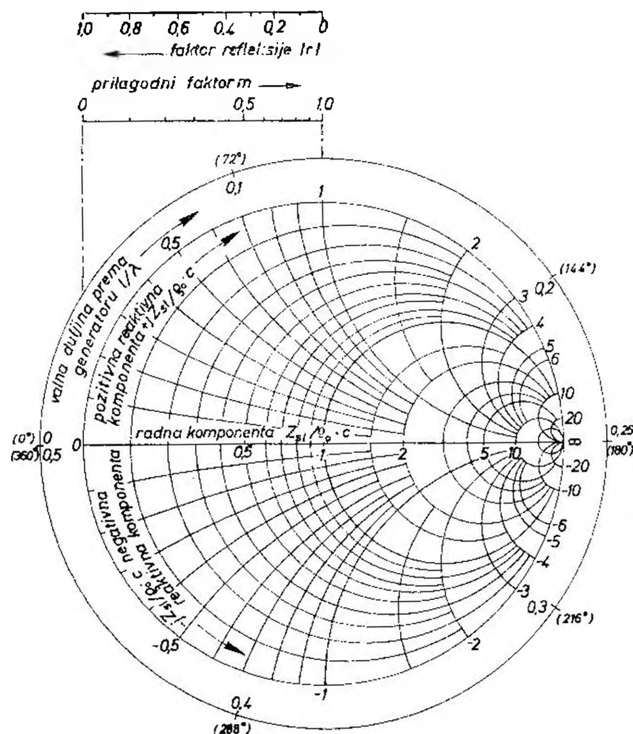
Prilog 4

ODREĐIVANJE REALNE I IMAGINARNE KOMPONENTE SPECIFIČNE AKUSTIČKE IMPEDANCIJE APSORBERA POMOĆU SMITHOVA DIJAGRAMA

Mjerenje koeficijenta apsorpcije pomoću cijevne metode, opisano u odjeljku 5.5.1, osniva se na pojavi stojnog vala zbog djelomične refleksije od apsorbera smještena na kraju cijevi. Istim uređajem može se odrediti realni i imaginarni dio specifične akustičke impedancije apsorbera.

Širenje zvučnih valova kroz cijev, dakle jednodimenzionalno širenje, slično je prostiranju elektromagnetskih valova uzduž električkog voda. Stoga se ta akustička pojava dade izraziti dvjema jednadžbama poznatima pod imenom električke valne jednadžbe voda. Budući da je taj postupak vrlo složen, u praksi se primjenjuju grafičke metode. Najčešće se za određivanje specifične akustičke impedancije upotrebljava *Smithov dijagram* (sl. P.4.1).

Faktor refleksije r, faktor prilagođenja m i duljina voda l/λ (izražena valnom duljinom) prikazani su u Smithovu dijagramu u polarnim koordinatama. Krivulje faktora r i m koncentrične su kružnice oko središnje točke dijagrama 1. Te kružnice nisu u dijagramu na sl. P.4.1. ucrtane, već su njihovi radijusi kao dužine naznačeni iznad dijagrama. Koordinata l/λ predočena je radijalnim zrakama s parametrom l/λ = konst. Zbog poluvalne periodičnosti vrijednosti za l/λ nanesene su samo od 0 do 0,5 i jednoliko raspoređene preko svih 360°. Zrake l/λ počinju sa $l/\lambda = 0$ (= 0°) u nultoj točki dijagrama, a nakon obilaska u smjeru kazaljki na satu završavaju također u nultoj točki sa $l/\lambda = 0{,}5$ (= 360°). Ekscentrične kružnice sa zajedničkom točkom ∞ prikazuju relativne akustičke impedancije za vrijednosti od 0 do ∞.

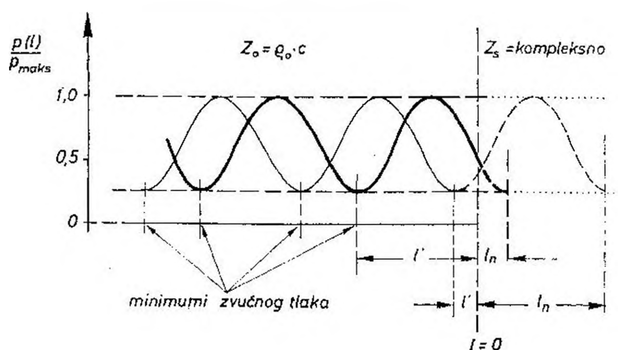


Sl. P. 4.1.

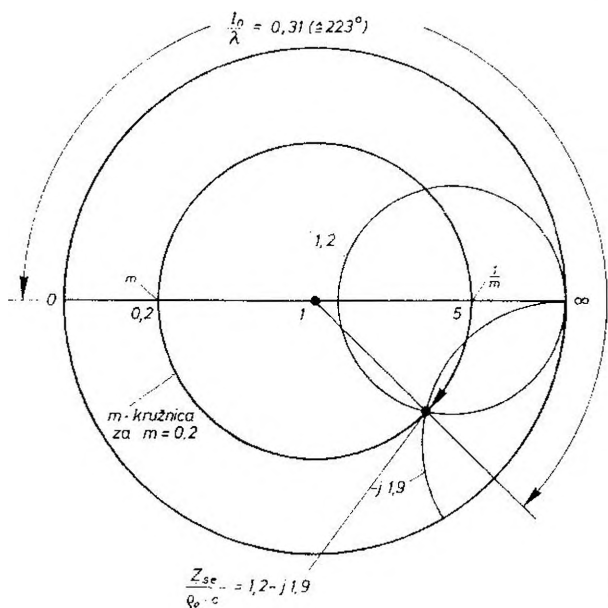
Ako je na kraju cijevi apsorber kojemu je specifična akustička impedancija kompleksna — što je općenit slučaj — tad je minimum zvučnog tlaka pomaknut (sl. P.4.2). To znači da l' nije ni nula, niti je jednako $\lambda/4$. Pomak je ovisan o veličini i predznaku imaginarne komponente.

Izračunavanje pomoću Smithova dijagrama provodi se uz pretpostavku da je cijev zatvorena materijalom s realnom akustičkom impedancijom. Stoga je potrebno kompleksnu akustičku impedanciju pretvoriti u *realnu nadomjesnu impedanciju*. To se postiže tako da se za kompleksnu akustičku impedanciju Z_k zamišlja kao da je nastala od realne nadomjesne impedancije $Z_n(\lessdot \varrho_o \cdot c)$ i dijela zvukovoda duljine $l_n = \left(\frac{\lambda}{2} - l'\right)$.

Smithov dijagram omogućuje da se kompleksna akustička impedancija nekoga apsorpcijskog uzorka dobije na temelju izmjerenog faktora prilagođenja $m = p_{min}/p_{maks}$ i nadomjesne duljine zvukovoda l_n. Kao primjer uzmimo da mjerenjem



Sl. P. 4.2.



Sl. P. 4.3.

dobiven omjer stojnog vala $p_{maks}/p_{min} = n\,(= 1/m)$ iznosi 5, i da je prvi minimum tlaka udaljen od kraja cijevi 0,08 m $(= l')$. Razmak između susjednih minimuma jest 0,21 m. Traži se specifična akustička impedancija Z_s toga apsorpcijskog uzorka.

Rješenje se dobiva tako da se u dijagramu (sl. P.4.3) najprije ucrta m-kružnica $\left(m = \frac{1}{5} = 0{,}2\right)$, a zatim l_n/λ-zraka $\left(\frac{l_n}{\lambda} = \frac{\frac{\lambda}{2} - l'}{\lambda} = \frac{0{,}21 - 0{,}08}{0{,}42} \approx 0{,}31 \text{ ili } \sim 223^\circ\right)$

Sjecište kružnice i zrake daje relativnu akustičku impedanciju $\frac{Z_s}{\varrho_o \cdot c} = 1{,}2 - j1{,}9$, iz čega se dobiva da je specifična akustička impendancija $Z_s = 492 - j779$ (Ns/m³).

Prilog 5

PRIBLIŽNO PRORAČUNAVANJE ZVUČNOG TLAKA U POLUODJEČNOJ PROSTORIJI

Pri sobnoj reprodukciji ne sluša se izravni zvuk što ga reproducira zvučnik, nego odječni. Razlog je u tome što pri slušanju, naročito stereofonske reprodukcije, slušatelj mora biti udaljen nekoliko metara od zvučnika.

Za poluodječnu prostoriju može se teorijski naći vrijednost zvučnog tlaka na nekoj udaljenosti od izvora zvuka. Zvučni tlak u nekoj točki prostorije sastoji se od dvije komponente: od tlaka izravnog zvuka i od tlaka odječnog zvuka koji u toj točki nastaje nakon mnogih refleksija od ploha prostorije. Izravni zvuk je funkcija faktora usmjerenosti zvučnog izvora i udaljenosti od izvora. Odječni zvuk ovisi samo o konstanti prostorije R.

Odnos između zvučne snage P i zvučnog tlaka p u velikoj poluodječnoj prostoriji matematički se izražava jednadžbom:

$$20 \log \frac{p}{p_o} - 10 \log \frac{P}{P_o} = 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R}\right)$$

Tu je: p_o — referentni zvučni tlak od $2 \cdot 10^{-5}$ Pa
P_o — referentna zvučna snaga od 10^{-12} W
R — konstanta prostorije u m²
Q — faktor usmjerenosti izvora zvuka.

Konstanta R karakterizira prostoriju u pogledu zvučne apsorpcije. Ta je konstanta matematički definirana izrazom:

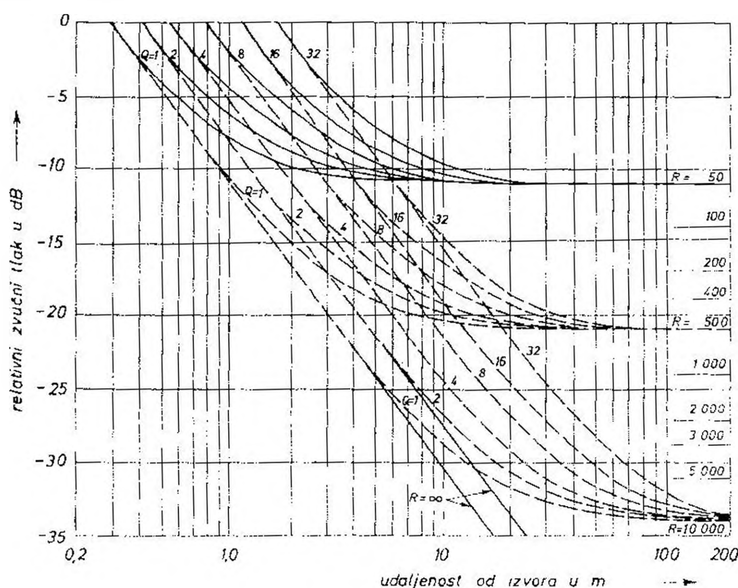
$$R = \frac{S \cdot a}{1 - a}$$

gdje je: S — ukupna apsorpcijska površina prostorije
a — prosječni koeficijent apsorpcije

Zvučnik kao izvor zvuka proizvodi na određenoj frekvenciji (ili na uskome frekvencijskom pojasu) u točki udaljenoj r m najveći tlak p u smjeru svoje osi. Neki idealni (omnidirekcionalni) emiter proizvodio bi na toj udaljenosti r isto toliki tlak p kao i zvučnik, ali s jednakom vrijednošću tlaka u svim smjerovima prostornog kuta 4π. Omjer zvučne snage takva idealnog emitera prema zvučnoj snazi realnog zvučnika naziva se faktorom usmjerenosti (direktivnosti). Za idealni (ne-

usmjereni) izvor zvuka koji bi bio smješten na tvrdu plohu (npr. na pod) Q bi imao vrijednost 2. Ako bi izvor bio postavljen u kut između dvije tvrde plohe, vrijednost za Q bila bi 4. Stavi li se izvor u ugao, dakle između tri tvrde plohe, Q postiže vrijednost 8. Za realni zvučnik te vrijednosti nisu takve, ali ih možemo uzeti kao približno točne za potrebe procjene zvučnog tlaka na niskim frekvencijama. Istaknut ćemo da tipična vrijenost za Q normalnoga zvučničkog stupa kakav se upotrebljava za razglas iznosi oko 5.

U dijagramu na sl. P.5.1. prikazana je veličina $10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R}\right)$ ovisno o udaljenosti r u metrima. Krivulje se odnose na različite konstante R u m^2 kao parametar, i za faktore usmjerenosti 1, 2, 4, 8, 16 i 32. Uz potpunu apsorpciju ($R = \infty$) i Q = 1 dobiva se primjer kad je neusmjereni (omnidirekcionalni) izvor u slobodnome zvučnom polju.



Sl. P. 5.1.

Da bi se mogao naći zvučni tlak, treba najprije znati konstantu R. Ona se dobiva mjerenjem vremena odjeka T i izračunavanjem pomoću jednadžbe:

$$R = \frac{V}{\frac{T}{0,16} - \frac{V}{S}}$$

u kojoj je:

V — volumen prostorije u m^3

S — ukupna apsorpcijska ploha u m^2

Izloženi postupak za izračunavanje zvučnog tlaka u prostoriji ne može se primijeniti u suviše malim prostorijama. U takvu, naime, slučaju nastaje povratno djelovanje na zvučni izvor, što mijenja emitiranu snagu. Prostoriju je dopušteno smatrati dovoljno velikom ako srednji slobodni put iznosi nekoliko valnih duljina.

Povoljno je da ona bude nepravilna oblika, a također i to da se u njoj nalazi namještaj, kao što uostalom većinom i jest.

Još valja napomenuti da je zvučni tlak u blizini tvrdih ploha, ili u uglu, veći nego što se dobiva proračunom. Tome su uzrok koncentrirane refleksije koje mogu u uglu prostorije povećati zvučni tlak i za 9 dB.

Kao primjer uzmimo da je konstanta prostorije $R = 500\ m^2$, a $Q = 2$. Iz krivulje izlazi da je razina zvučnog tlaka na udaljenosti od 2 m praktički jednaka onoj kao da sobe nema. Razlika je manja od 1 dB. Međutim, na udaljenostima većima od 10 m zvučnom tlaku vrijednost je približno jednaka na svim mjestima prostorije. Na temelju tog primjera može se zaključiti da za radnika koji radi uz bučni stroj nije od koristi ako se poveća apsorpcija prostorije. Naprotiv, za radnika na većoj udaljenosti od tog stroja zvučni tlak će se pri svakom udvostručivanju konstante R smanjiti za 3 dB. Iz krivulja se vidi da je u odječnom polju zvučni tlak praktički neovisan o Q. Također, što je Q veće, to se na veću udaljenost proteže izravno zvučno polje.

U drugom primjeru pretpostavimo da neka velika prostorija ima konstantu $R = 1\,250\ m^2$. Izračunajmo kolika je razina zvučnog tlaka 9 m od neusmjerena izvora koji zrači akustičku snagu od 0,25 W, a smješten je na pod do zida (dakle, $Q = 4$).

Razina zvučne snage bit će prema jednadžbi (1.29):

$$L_P = 10 \log \frac{P}{10^{-12}} = 10 \log P + 120 = 10 \log 0{,}25 + 120 = 114\ \text{dB}$$

Iz prve jednadžbe ovog priloga izlazi da je razina zvučnog tlaka:

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} = 10 \log \frac{P}{P_0} + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right)$$

Prema tome, za razinu zvučnog tlaka u našem primjeru dobivamo vrijednost:

$$L_p = 10 \log 0{,}25 + 120 + 10 \log \left(\frac{4}{4\pi \cdot 9^2} + \frac{4}{1\,250} \right) \approx 92\ \text{dB}$$

dakle približno 8 μbar ili 0,8 Pa.

Prilog 6

ODREĐIVANJE GRANIČNIH VRIJEDNOSTI ZA POJEDINU VRSTU BUKE NA TEMELJU N-KRIVULJA

Prema ISO-preporuci (1960) za određivanje graničnih vrijednosti pojedine vrste buke služe krivulje na sl. P.6.1 (*Noise Rating Curves*). Svaka od *N*-krivulja, kako se nazivaju, označena je svojim brojem. Ti su brojevi jednaki broju decibela što ga imaju oktavnopojasni zvučni tlakovi na središnjoj frekvenciji od 1 000 Hz.

Dopuštena granična vrijednost izračunava se na ovaj način:

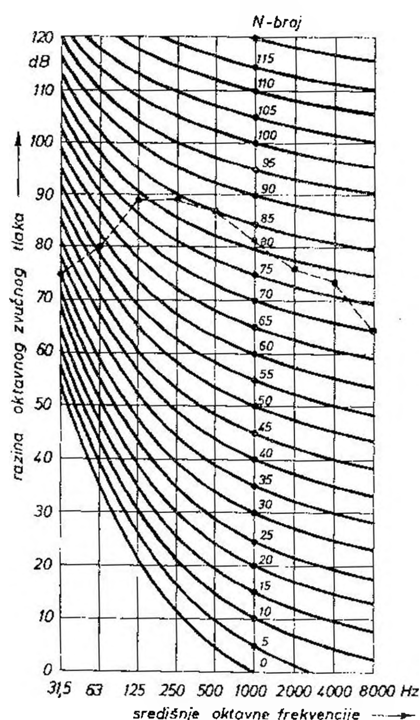
1. Izmjeri se razina zvučnog tlaka po oktavnim pojasovima i ucrta u dijagram.
2. Potraži se najniža *N*-krivulja koju oktavni spektar buke ne presijeca ili je dodiruje. Broj uz tu krivulju je *N*-broj mjerene buke. Na primjer, na sl. P.6.1. to je vrijednost N 85. Međuvrijednosti između krivulja nisu predviđene.

Kriteriji za određivanje dopuštene razine buke mogu biti različiti, kao što su npr. akustička udobnost, govorna razumljivost, zaštita od slušnog oštećenja itd.

U slijedećoj tablici navedeni su *N*-brojevi koji prema iskustvu vrijede za prostorije u kojima se obavlja određena specifična djelatnost:

	N-broj
Radio-studio	15
Koncertna dvorana, kazalište do 500 sjedala	20
Školska soba, televizijski studio, konferencijska dvorana do 50 sjedala	25
Spavaonica	25
Konferencijska dvorana s 20 sjedala, kino, bolnica, knjižnica	30
Mali ured	40
Gostionica	45
Ured s pisaćim strojevima	55
Radionica	65

Kriteriji prema N-krivuljama vrijede za komercijalne zgrade, i to uglavnom za govor. Njihova primjena na drugim područjima djelatnosti ne mora biti valjana.



Sl. P. 6.1.

Primjena N-krivulja u usporedbi s ocjenjivanjem dopuštene razine buke na temelju mjerenja zvukomjerom uz A-krivulju ima ozbiljne nedostatke:

a) mjerenje je složenije i još k tome potrebno je ucrtavati spektralnu karakteristiku;
b) polazeći samo od najviše N-vrijednosti jednoga oktavnog područja, ispušta se iz razmatranja ukupna spektralna širina buke;
c) oblik N-krivulja nije u skladu s frekvencijskom karakteristikom osjeta glasnoće, a isto tako ni s graničnom razinom u vezi s oštećenjem sluha.

Spomenuti prigovori bili su razlog da je ISO za ocjenjivanje graničnih vrijednosti buke prešla s N-krivulja na A-krivulje (*ISO/TC 43/SC 1. Third Draft Secretariat Proposal for Assessment of Noise-Exposure During Work for Hearing Conservation Purposes* (1968).

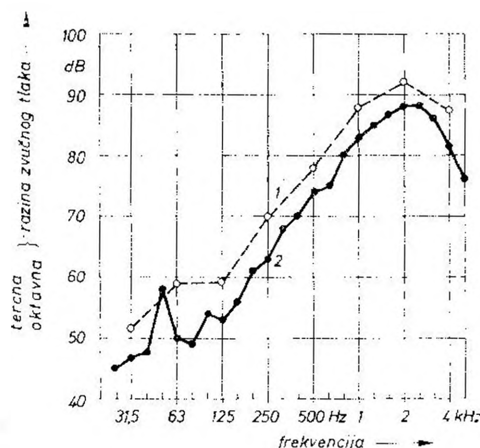
Prilog 7

PRIJELAZ S TERCNOG SPEKTRA NA OKTAVNI

Kad je potrebno da se na temelju tercnopojasnog dijagrama računski dobije oktavnopojasni dijagram, postupa se prema pravilu zbrajanja razina zvučnih tlakova. Kao primjer uzmimo u dijagramu na sl. P.7.1. oktavu sa središnjom frekvencijom od 1 000 Hz. Tercne središnje frekvencije u toj oktavi su 1 250 Hz, 1 000 Hz i 800 Hz. Na tim frekvencijama razine tercnih zvučnih tlakova imaju vrijednosti $L_1 = 85$ dB, $L_2 = 83$ dB i $L_3 = 80$ dB. Uz pomoć dijagrama na sl. 2.21. ukupna se razina dobiva postupno:

$$\left.\begin{array}{l} \left.\begin{array}{l} L_1 = 85\ \text{dB} \\ L_2 = 83\ \text{dB} \end{array}\right\} L_{12} = 87{,}2\ \text{dB} \\ L_3 = 80\ \text{dB} \end{array}\right\} L_{123} = 88\ \text{dB}$$

Dobivamo, dakle, da je $L_{okt} = L_{123} = 88$ dB.



Sl. P. 7.1.

Na središnjoj tercnoj frekvenciji od 50 Hz krivulji je izdignut vrh, čega na oktavnoj krivulji nema. To je razumljivo jer tercni dijagram sadržava više informacija nego oktavni. Stoga prijelaz s oktavnog spektra na tercni nije moguć. Zanemarimo li činjenicu da je tercni spektar bogatiji informacijama i pretpostavimo da sve tri terce u pojedinoj oktavi imaju jednake razine, možemo na temelju dijagrama na sl. 2.21. dobiti da je tercna razina zvučnog tlaka:

$$L_{tercno} = L_{oktavno} - 4{,}8\ (\text{dB})$$

Prilog 8

OKTAVE

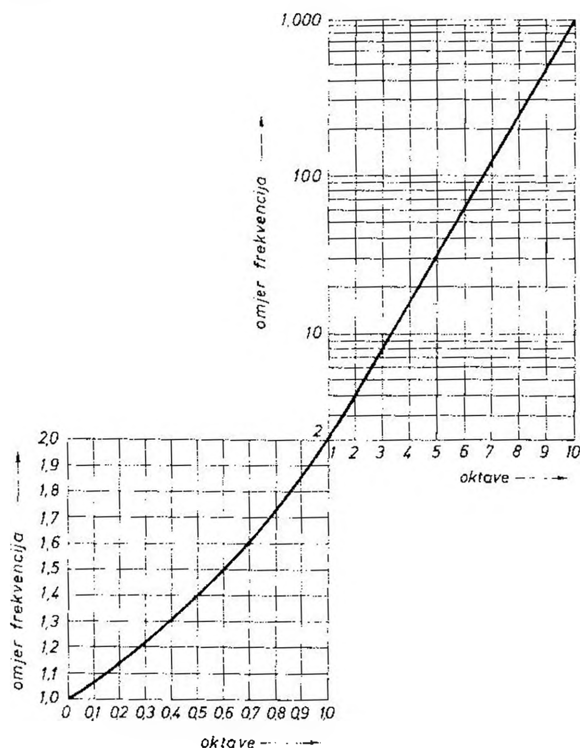
Oktava je kao filtarski propusni pojas često preširoka. Danas se u analizi mnogo upotrebljavaju tercni pojasovi, a i poluoktavni.

Bilo koji pojas izražen u oktavama dade se izračunati na temelju izraza:

$$omjer\ frekvencija = 2^n$$

gdje je n broj oktava.

Ako je $n = 1$, omjer frekvencija je 2 : 1, pa je riječ, dakle, o pojasu ili intervalu od jedne oktave.



Sl. P. 8.1.

Za pojas koji obuhvaća 1,5 oktave gornji izraz daje omjer frekvencija:

$$2^{1,5} = 2,828$$

Frekvencija koja je za 1,5 oktave viša od 1000 Hz prema tome je frekvencija od 2828 Hz.

Jednoj trećini oktave odgovara omjer krajnjih frekvencija od:

$$2^{1/3} = 1,26$$

U poluoktavnom pojasu omjer krajnjih frekvencija bit će:

$$2^{1/2} = 1,41$$

Dijagram na sl. P.8.1. omogućuje da se izravno otčita omjer krajnjih frekvencija za pojasove izražene u oktavama.

Središnja frekvencija f_s pojasa koji se nalazi između frekvencija f_1 i f_2 dobiva se iz izraza:

$$f_s = \sqrt{f_1 \cdot f_2}$$

Primjer: koja je središnja frekvencija pojasa između 100 Hz i 5000 Hz?

$$f_s = \sqrt{100 \cdot 5000} = 707 \text{ Hz}$$

Prilog 9

PREPORUČENE FREKVENCIJE

Kako bi se u akustičkim mjerenjima rezultati mogli uspoređivati, moraju pojasna mjerenja biti izvedena uvijek na istim središnjim frekvencijama. Prema ISO-preporuci (*ISO R.* 266) to su frekvencije navedene u priloženoj tablici. Osnova za geometrijski niz preporučenih frekvencija jest frekvencija od 1 000 Hz. Ta frekvencija ima veliko značenje u akustici pa je stoga odabrana kao normalna ili standardna frekvencija (muzički normalni ton a^1 ima frekvenciju od 440 Hz).

Preporučene frekvencije	oktavne	poluoktavne	trećinskooktavne	Preporučene frekvencije	oktavne	poluoktavne	trećinskooktavne	Preporučene frekvencije	oktavne	poluoktavne	trećinskooktavne
16	×	×	×	**160**			×	**1600**			×
18				180		×		1800			
20			×	**200**			×	**2000**	×	×	×
22.4		×		224				2240			
25			×	**250**	×	×	×	**2500**			×
28				280				2800		×	
31.5	×	×	×	**315**			×	**3150**			×
35.5				355		×		3550			
40			×	**400**			×	**4000**	×	×	×
45		×		450				4500			
50			×	**500**	×	×	×	**5000**			×
56				560				5600		×	
63	×	×	×	**630**			×	**6300**			×
71				710		×		7100			
80			×	**800**			×	**8000**	×	×	×
90		×		900				9000			
100			×	**1000**	×	×	×	**10000**			×
112				1120				11200		×	
125	×	×	×	**1250**			×	**12500**			×
140				1400		×		14000			
160			×	**1600**			×	**16000**	×	×	×

Prilog 10

TABLICA DECIBELA

Broj decibela (= x)	Omjer zvučnih tlakova ili titrajnih brzina		Omjer zvučnih snaga	
	povećanje	smanjenje	povećanje	smanjenje
0,1	1,01	0,989	1,02	0,977
0,2	1,02	0,977	1,05	0,955
0,3	1,03	0,966	1,07	0,933
0,4	1,05	0,955	1,10	0,912
0,5	1,06	0,944	1,12	0,891
0,6	1,07	0,933	1,15	0,871
0,7	1,08	0,923	1,17	0,851
0,8	1,10	0,912	1,20	0,832
0,9	1,11	0,902	1,23	0,813
1,0	1,12	0,891	1,26	0,794
1,1	1,13	0,881	1,29	0,776
1,2	1,15	0,871	1,32	0,759
1,3	1,16	0,861	1,35	0,741
1,4	1,17	0,851	1,38	0,724
1,5	1,19	0,841	1,41	0,708
1,6	1,20	0,832	1,44	0,692
1,7	1,22	0,822	1,48	0,676
1,8	1,23	0,813	1,51	0,661
1,9	1,24	0,803	1,55	0,646
2,0	1,26	0,794	1,58	0,631
2,2	1,29	0,776	1,66	0,603
2,4	1,32	0,759	1,74	0,575
2,6	1,35	0,741	1,82	0,550
2,8	1,38	0,724	1,90	0,525
3,0	1.41	0,708	1,99	0,501
3,2	1,44	0,692	2,09	0,479
3,4	1,48	0,676	2,19	0,457
3,6	1,51	0,661	2,29	0,436
3,8	1,55	0,646	2,40	0,417
4,0	1,58	0.631	2,51	0,398
4,2	1,62	0.617	2,63	0,380
4,4	1,66	0,603	2,75	0,363
4,6	1,70	0,589	2,88	0,347
4,8	1,74	0,575	3,02	0,331
5,0	1,78	0,562	3,16	0,316
5,5	1,88	0,531	3,55	0,282
6,0	1,99	0,501	3,98	0,251
6,5	2,11	0,473	4,47	0,224
7,0	2,24	0,447	5,01	0,199
7,5	2,37	0,422	5,62	0,178
8,0	2,51	0,398	6,31	0,158
8,5	2,66	0,376	7,08	0,141
9,0	2.82	0,355	7,94	0.126
9,5	2,98	0,335	8,91	0,112
10,0	3,16	0,316	10,0	0,100
11	3,55	0,282	12,6	0,079
12	3,98	0,251	15,8	0,063
13	4,47	0,224	19,9	0,050
14	5,01	0,199	25,1	0,040
15	5,62	0,178	31,6	0,032
16	6,31	0,158	39,8	0,025
17	7,08	0,141	50,1	0,020
18	7,94	0,126	63,1	0,016

Broj decibela ($\pm x$)	Omjer zvučnih tlakova ili titrajnih brzina		Omjer zvučnih snaga	
	povećanje	smanjenje	povećanje	smanjenje
19	8,91	0,112	79,4	0,013
20	10,0	0,100	100,0	0,010
25	17,8	0,056	316	$3{,}16 \cdot 10^{-3}$
30	31,6	0,032	1000	10^{-3}
35	56,2	0,018	3160	$3{,}16 \cdot 10^{-4}$
40	100,0	0,010	10^{4}	10^{-4}
45	178	0,006	$3{,}16 \cdot 10^{4}$	$3{,}16 \cdot 10^{-5}$
50	316	0,003	10^{5}	10^{-5}
55	562	0,002	$3{,}16 \cdot 10^{5}$	$3{,}16 \cdot 10^{-6}$
60	1000	0,001	10^{6}	10^{-6}
65	1780	$6 \cdot 10^{-4}$	$3{,}16 \cdot 10^{6}$	$3{,}16 \cdot 10^{-7}$
70	3160	$3 \cdot 10^{-4}$	10^{7}	10^{-7}
75	5600	$2 \cdot 10^{-4}$	$3{,}16 \cdot 10^{7}$	$3{,}16 \cdot 10^{-8}$
80	10000	10^{-4}	10^{8}	10^{-8}
85	17800	$6 \cdot 10^{-5}$	$3{,}16 \cdot 10^{8}$	$3{,}16 \cdot 10^{-9}$
90	31600	$3 \cdot 10^{-5}$	10^{9}	10^{-9}
95	56000	$2 \cdot 10^{-5}$	$3{,}16 \cdot 10^{9}$	$3{,}16 \cdot 10^{-10}$
100	100000	10^{-5}	10^{10}	10^{-10}

Primjeri primjene tablice decibela prilikom izračunavanja razina zvučnog tlaka, zvučnog intenziteta i zvučne snage

Formula za izračunavanje razine zvučnog tlaka izraženog u mikrobarima glasi:

$$L_p = 20 \log \frac{p\ (\mu\text{bar})}{2 \cdot 10^{-4}\ (\mu\ \text{bar})} = 20 \log (p \cdot 0{,}5 \cdot 10^{4})$$

$$L_p = 20 \log p - 6 + 80$$

$$L_p = 20 \log p + 74\ \text{(dB)}$$

S tlakom izraženim u paskalima:

$$L_p = 20 \log \frac{p\ \text{(Pa)}}{2 \cdot 10^{-5}\ \text{(Pa)}} = \log (p \cdot 0{,}5 \cdot 10^{5})$$

$$L_p = 20 \log p - 6 + 100$$

$$L_p = 20 \log p + 94\ \text{(dB)}$$

Primjer: Kolika je razina zvučnog tlaka od 0,5 μbar i od 2,5 Pa?

$$L_p = 20 \log 0{,}5 + 74 =$$

$$= -6 + 74 = 68\ \text{dB (iznad } 2 \cdot 10^{-4}\ \mu\text{bar)}$$

$$L_p = 20 \log 2{,}5 + 94 =$$

$$= 8 + 94 = 102\ \text{dB (iznad } 20\ \mu\text{Pa)}$$

Za izračunavanje zvučnog intenziteta vrijedi:

$$L_I = 10 \log \frac{I(\text{W/m}^2)}{10^{-12}(\text{W/m}^2)} =$$

$$L_I = 10 \log (I \cdot 10^{12})$$

$$L_I = 10 \log I + 120\ \text{(dB)}$$

Primjer: Kolika je razina zvučnog intenziteta od 5 W/m^2?

$$L_I = 10 \log 5 + 120 = 127\ \text{dB (iznad } 10^{-12}\ \text{W/m}^2)$$

Razina zvučne snage izračunava se prema formuli:

$$L_P = 10 \log \frac{P(\text{W})}{10^{-12}\ (\text{W})} = \log P + 120\ \text{(dB)}$$

Primjer: Kolika je razina zvučne snage od 0,1 W?

$$L_P = 10 \log 0{,}1 + 120 = 110\ \text{dB (iznad } 10^{-12}\ \text{W)}$$

Prilog 11

TABLICA MUZIČKIH FREKVENCIJA

Muzička oznaka	Frekvencija u Hz	Muzička oznaka	Frekvencija u Hz
C_2	16,35	c^2	523,25
D_2	18,35	d^2	587,33
E_2	20,60	e^2	659,26
F_2	21,83	f^2	698,46
G_2	24,50	g^2	783,99
A_2	27,50	a^2	880,00
H_2	30,87	h^2	987,77
C_1	32,70	c^3	1046,51
D_1	36,71	d^3	1174,67
E_1	41,20	e^3	1318,52
F_1	43,65	f^3	1396,92
G_1	49,00	g^3	1567,99
A_1	55,00	a^3	1760,00
H_1	61,74	h^3	1975,54
C	65,41	c^4	2093,02
D	73,41	d^4	2349,33
E	82,41	e^4	2637,03
F	87,31	f^4	2793,84
G	98,00	g^4	3135,98
A	110,00	a^4	3520,00
H	123,47	h^4	3951,09
c	130,81	c^5	4186,03
d	146,83	d^5	4698,66
e	164,81	e^5	5274,07
f	174,61	f^5	5587,68
g	196,00	g^5	6271,97
a	220,00	a^5	7040,00
h	246,94	h^5	7902,18
c^1	261,63	c^6	8372,06
d^1	293,67	d^6	9397,32
e^1	329,63	e^6	10548,13
f^1	349,23	f^6	11175,36
g^1	392,00	g^6	12543,93
a^1	440,00	a^6	14080,00
h^1	493,89	h^6	15804,36

POPIS OZNAKA U FORMULAMA

Latinska slova

a	pomačna amplituda
a	prema Sabineu apsorpcija površina u dvorani koje nisu pokrivene jastucima
A	amplituda zvučnog tlaka
A	apsorpcija prijemne prostorije
A	duljina prostorije
A, A_1, A_2	ukupna apsorpcija prostorije
A_r	broj apsorpcijskih jedinica na rezonantnoj frekvenciji
b	širina raspora rezonatora
B	amplituda zvučnog tlaka reflektiranog vala
B	širina prostorije
c, c_1, c_2	brzine širenja zvuka
c_i	brzina gibanja izvora zvuka
c_p	brzina gibanja promatrača
c_v	brzina vjetra
C	visina prostorije
d	debljina rezonatorske ploče
df	frekvencijski pojas
dN	broj rezonantnih frekvencija prostorije u nekom frekvencijskom pojasu
D	razlika zvučnih razina
D_N	normirana razlika zvučnih razina
E	modul elastičnosti
E, E_1, E_2	gustoće zvučne energije
E_d	gustoća zvučne energije direktnog zvuka
E_o	gustoća zvučne energije na početku procesa odjeka
f, f_1, f_2	frekvencije
f_i	frekvencija izvora zvuka
f_p	frekvencija koju kao rezultat Dopplerova efekta čuje promatrač
f_r	rezonantna frekvencija
h	slobodna visina glave slušatelja u posljednjem redu
h	udaljenost rezonatorske ploče od zida
h_1, h_2, h_3, ..., h_n	povišenje prvog, drugog, trećeg, odnosno n-tog reda sjedala
h_n, h_{n-1}	slobodna visina glave u n-tom, odnosno $(n-1)$. redu iznad ravnine glave slušalaca u horizontalnom dijelu dvorane
H	visina izvora zvuka iznad glava slušatelja u prostoriji
I, I_1, I_2, I_3, ..., I_n	zvučni intenziteti ili jakosti zvuka
I_a	indeks zvučne izolacije vertikalne pregrade
I_t	indeks stropne zvučne izolacije
I_o	početni intenzitet zvuka u procesu odjeka
I_o	referentni zvučni intenzitet (10^{-12} W/m²)
k	omjer gustoća zvučnih energija
k	konstanta u eksponentu jednadžbe utišavanja zvuka (4.8)
k_b	faktor redukcije razumljivosti ovisan o razini buke
k_g	faktor redukcije razumljivosti ovisan o glasnoći
k_o	faktor redukcije razumljivosti ovisan o vremenu odjeka
K	kompresibilnost tekućine
K	Sabineova konstanta

l	dubina raspora rezonatora
l	efektivna duljina grla rezonatora
l	srednji slobodni put zvučne zrake
$l_1, l_2, l_3, \ldots, l_i$	putovi između dvije uzastopne refleksije
l_k	korigirana duljina vrata rezonatora
l_{min}	mimimalan razmak izmedu elemenata dvostruke pregrade
L	razina glasnoće, broj fona
L_1, L_2	razina zvučnih tlakova
L_f	razina glasnoće u fonima
L_I	razina zvučnog intenziteta
L_n	normirana razina stropne buke
L_p	razina zvučnog tlaka
L_P	razina zvučne snage
L_s	glasnoća u ISO-sonima
L_t	razina stropne buke
m	koeficijent apsorpcije zraka
M, M_2	mase pregrada po jedinici površine
n	broj decibela
n	broj izvora zvuka
n	broj refleksija zvučne zrake u sekundi
n	odnos amplituda najvišeg i najnižeg zvučnog tlaka u stojnom valu
N	broj refleksija zvučne zrake za vrijeme odjeka
$N_1, N_2, \ldots, N_i$	broj refleksija zvučne zrake na odgovarajućim površinama $S_1, S_2, \ldots, S_i$
p	0, 1, 2, 3, ... u formuli (4.1)
$p, p_1, p_2, p_3, \ldots, p_n$	efektivne vrijednosti zvučnog tlaka
p_m	amplituda zvučnog tlaka
p_{maks}	maksimalni zvučni tlak
p_{min}	minimalni zvučni tlak
p_o	atmosferski tlak
p_o	referentni zvučni tlak (20 μPa ili $2 \cdot 10^{-4}$ μbar)
P, P_1, P_2	zvučna snaga
$P\%$	postotak perforacije panelnog rezonatora
q	0, 1, 2, 3, ... u formuli (4.1)
q, q_n	zvučna propusnost
r	0, 1, 2, 3, ... u formuli (4.1)
r	koeficijent refleksije
r	razmak između redova sjedala
r	stupanj zvučnog prigušivanja
R	sniženje razine buke
R	udaljenost od točkastog izvora zvuka
R	zvučno prigušivanje
R, R_2	srednje zvučno prigušivanje
R_{rez}	rezultantno srednje zvučno prigušivanje
$R_1, R_2, R_3, \ldots, R_n$	pojedinačno zvučno prigušivanje
S	površina pregrade pri mjerenju
S	površina svih ploha u prostoriji
S	presjek grla rezonatora
S	udaljenost posljednjeg sjedala od izvora zvuka
S	ukupna površina pregrade
$S, S_1, S_2, \ldots, S_i, S_n$	površine ploha
S_2	površina vrata ili prozora
S_{maks}	najveći indeks glasnoće
S_o	ukupna površina pregrade
S_r	slogovna razumljivost
S_{uk}	ukupna glasnoća dobivena na temelju formule za zbrajanje indeksa glasnoća
S_x	površina mjerenog apsorpcijskog materijala
t	temperatura zraka u °C
t	vrijeme
T	vrijeme utišavanja zvuka
T, T_2	vrijeme odjeka prema Sabineu
T_{opt}	optimalno vrijeme odjeka

T_x	vrijeme odjeka nakon unošenja apsorpcijskog materijala
v, v_1, v_2	efektivne vrijednosti titrajne brzine
v_m	amplituda titrajne brzine
V	volumen prostorije
V	volumen rezonatora
Z_1, Z_2	akustički otpori (impedancije)
x	duljina rasprostrtih jastuka prema Sabineu

Grčka slova

α	kut zvučne zrake prema vertikali na plohu
α, α_1, α_2, α_3, ..., α_i, α_n	koeficijenti apsorpcije
α_{opt}	optimalni koeficijent apsorpcije
α_x	koeficijent apsorpcije mjerenog materijala
β	kut zvučne zrake prema vertikali na plohu
γ	odnos specifične topline zraka uz konstantan tlak prema specifičnoj toplini uz konstantan volumen
ΔI_a	zvučna izolacija pregrade
ΔI_i	stropna zvučna izolacija
ΔL	korektivni član glasnoće
ΔR	smanjenje srednjeg zvučnog prigušivanja
λ	valna duljina
λ_r	valna duljina na rezonantnoj frekvenciji
ϱ_0	gustoća materije
ΣS	zbroj svih indeksa glasnoće

LITERATURA

Knjige

1. *Békésy, G.*, Experiments in Hearing, McGraw-Hill Book Company, Inc. New York, Toronto, London, 1960.
2. *Beranek, L. L.*, Acoustics, McGraw-Hill Publishing Company Ltd, 1950.
3. *Beranek, L. L.*, Acoustic Measurements, John Wiley & Sons, Inc., Chapman & Hall Ltd, 1950.
4. *Beranek, L. L.*, Music, Acoustics & Architecture, John Wiley & Sons, Inc., 1962.
5. *Bernhart, J.*, Traité de prise de son, Éditions Eyrolles, Paris 1949.
6. *Blauert, J.*, Räumliches Hören, S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 1974.
7. *Braunmühl, H. J.—Weber, W.*, Einführung in die angewandte Akustik, Verlag von S. Hirzel in Leipzig, 1936.
8. *Broch, J. T.*, Acoustic Noise Measurements, Brüel & Kjaer, 1971.
9. *Broch, J. T.*, Messungen von mechanischen Schwingungen und Stössen, Brüel & Kjaer, 1970.
10. *Brüel, P. V.*, Sound Insulation and Room Acoustics, Chapman & Hall, London, 1951.
11. *Bürck, W.*, Grundlagen der praktischen Elektroakustik, Elektro-Verlag W. Sachon KG, Mindelheim, 1953.
12. *Bürck, W.*, Die Schallmessfibel für die Lärmbekämpfung, Verlag R. Oldenbourg KG, München, 1960.
13. *Cremer, L.*, Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik, S. Hirzel Verlag
    Bd. I. Geometrische Raumakustik, Stuttgart, 1948;
    Bd. II. Statistische Raumakustik, Stuttgart, 1961;
    Bd. III. Wellentheoretische Raumakustik, Leipzig, 1950.
14. *Cullum, D. J. W.*, Acoustic Principles, E. & F. Spon Limited, London, 1955.
15. *Culver, Ch. A.*, Musical Acoustics, McGraw-Hill Book Company, Inc., 1956.
16. *Damjanović, A.—Kurtović, H.*, Elektroakustika, Zavod za izdavanje udžbenika NRS, Beograd, 1960.
17. *Efron, A.*, Sound, John Rider Publisher, Inc., New York, 1957.
18. *Fasold, W.—Sonntag, E.*, Bauphysikalische Entwurfslehre, Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, Köln — Braunsfeld, 1972.
19. *Flanagan, J. L.*, Speech Analysis, Synthesis and Perception, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1972.
20. *Fletcher, H.*, Speech and Hearing in Communication, D. Van Nostrand Company, Inc., 1953.
21. *Furrer, W.—Lauber, A.*, Raum- und Bauakustik, Lärmabwehr, Birkhäuser Verlag, Basel und Stuttgart, 1972.
22. *Gilford, Ch.*, Acoustics for Radio and Television Studios, Peter Peregrinus Ltd., London 1972.
23. *Green, D. M.*, An Introduction to Hearing, Lawrence Erlbaum Associates Publishers, Hillsdale, New Jersey, 1976.
24. *(Harris, C. M.)*, Handbook of Noise Control, McGraw-Hill Book Company, 1957.
25. *Hartmann, G.*, Praktische Akustik, I i II, R. Oldenbourg Verlag, München—Wien. 1964.
26. *Ingerslev, F.*, Acoustics in modern Building Practice, The Architectural Press, London 1952.
27. *Kinsler, L. E.—Frey, A. R.*, Fundamentals of Acoustics, Joh Willey & Sons, Inc., New York — Chapman & Hall, Limited, London, 1950.
28. *Knudsen, V. O.*, Architectural Acoustics, John Wiley & Sons, Inc., 1949.
29. *Knudsen, V. O.—Harris, C. M.*, Acoustical Designing in Architecture, John Wiley & Sons, Inc., 1950.

30. *Kraak, W.—Weissing, H.*, Schallpegelmesstechnik, VEB Verlag Technik, Berlin, 1970.
31. *Kurtović, H.*, Elektroakustika II, Zavod za izdavanje udžbenika NRS, Beograd 1960.
32. *Kuttruff, H.*, Room Acoustics, Applied Science Publishers LTD, London 1973.
33. *Lehmann, R.*, L'acoustique des bâtiments, Presses universitaires de France, Paris, 1961.
34. *Littler, T. S.*, The Physics of the Ear, Pergamon Press, Oxford, London, Edinburgh, New York, Paris, Frankfurt, 1965.
35. *Magrab, E. B.*, Environmental Noise Control, John Willey & Sons, New York, London, Sidney, Toronto, 1975.
36. *Mankovsky, V. S.*, Acoustics of Studios and Auditoria, Focal Press, London & New York 1971.
37. *Meyer, E.—Neumann, E. G.*, Physikalische und Technische Akustik, Friedr. Vieweg + Sons, Braunschweig, 1975.
38. *Moir, J.*, High Quality Sound Reproduction, Chapman & Hall Ltd., London 1958.
39. *Newitt, J. H.*, High Fidelity Techniques, Rinehart & Company, Inc., New York, 1953.
40. *Olson, H. F.*, Acoustical Engineering, D. Van Nostrand Company, Inc., 1957.
41. *Olson, H. F.*, Musical Engineering, McGraw-Hill Company, Inc., 1952.
42. *Parkin, P. H.—Humphreys, H. R.*, Acoustics, Noise and Buildings, Faber and Faber Ltd, London, 1958.
43. *Plath, P.*, Das Hörorgan und seine Funktion, Marhold, Berlin.
44. *Rettinger, M.*, Applied Architectural Acoustics, Chemical Publishing Co., Inc., Brooklin, 1947.
45. *Rettinger, M.*, Practical Electroacoustics, Thames & Hudson, London.
46. *(Richardson, E. G)*, Technical Aspects of Sound, Volume I, Elsevier Publishing Company 1953.
47. *Sabine, W. C.*, Collected Papers on Acoustics, Dover Publication Inc., New York, (1922) 1964.
48. *Sales, G.—Pye, D.*, Ultrasonic Communication by Animals, Chapman and Hall, London, 1974.
49. *Schaudinischky, L. H.*, Sound, Man and Building, Applied Science Publishers LTD, London, 1976.
50 *Schoch, A.*, Die physikalischen und technischen Grundlagen der Schalldämmung im Bauwesen, Verlag von S. Hirzel in Leipzig, 1937.
51. *Slawin, I. I.*, Industrielärm und seine Bekämpfung, VEB Verlag Technik, Berlin, 1960.
52. *Skudrzyk, E.*, Die Grundlagen der Akustik, Springer-Verlag, 1950.
53. *Slot, G.*, Audio Quality, Philips-Paperbacks, 1964.
54. *Stevens, S. S.—Warshofsky, F.*, Schall und Gehör, Life, 1966.
55. *Trendelenburg, F.*, Einführung in die Akustik, Springer-Verlag, 1950.
56. *Veit, I.*, Technische Akustik, Vogel-Verlag, Würzburg, 1974.
57. *Wever, E. G.*, Theory of Hearing, John Wiley & Sons, Inc., New York, Chapman & Hall, Limited, London, 1949.
58. *Wever, E. G.—Lawrence, M.*, Physiological Acoustics, Princeton University Press, Princeton, New Yersey, 1951.
59. *Winstanley, J. W.*, Textbook on Sound, Longmans, Green and Co., New York, 1952.
60. *Wood, A.*, The Physics of Music, Methuen & Co., Ltd., London, 1950.
61. *Zwicker, E.—Feldtkeller, R.*, Das Ohr als Nachrichtenempfänger, S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 1967.
62. *Zwicker, C.—Kosten, C. W.*, Sound Absorbing Materials, Elsevier Publishing Company, Inc., 1949.
63. * * * Resonant Absorber and Reverberation, published by The Physical Society, London, 1949.

Članci u časopisima

1. *Békésy, G.*, Über die mechanische Frequenzanalyse in der Schnecke verschiedener Tiere, Akustische Zeitschrift, Januar, 1944.
2. *Brand, W.—Broch, J. T.*, Noise measurements and estimation of total loudness by spectrum analyses, B & K Technical Review, January 1956.
3. *Brüel, V.*, Determination of acoustical quality of rooms from reverberation curves, B & K Technical Review, July, 1956.
4. *Duda, J.*, Anechoic rooms, their design and use, Electronic World, December 1960.
5. *Eger, H. H.*, Das Mittelohr, Hörgeräte-Akustik, Jan. 1966.

6. *Feldmann, H.*, Schall und Gehör als Mittel der Kommunikation und Umweltbeziehung, Hörgeräte-Akustik, Mai 1966.
7. *Harris, C. H.*, Effects of Humidity on Velocity of Sound in Air, The Journal of the Acoustical Society of America, March 1971.
8. *Hemingway, J. R.*, The Measurement of Reverberation Characteristics, B & K Technical Review, No. 1, 1973.
9. *Hubbard, H. H.*, Nature of the Sonic-Boom Problem, The Journal of the Acoustical Society of America, May 1966.
10. *Ingerslev, F.—Pedersen, O. J.—Moeller, P. K.—Kristensen, J.*, The Anechoic Chambers at the Technical University of Denmark, B & K Technical Review, No. 2, 1968.
11. *Kath, U.—Kuhl, W.*, Einfluss von Streufläche und Hallraumdimensionen auf den gemessenen Schallabsorptionsgrad, Acustica, Vo. 11, No. 1, 1961.
12. *Kleis, D.*, Moderne Beschallungstechnik, I. Algemeine Grundlagen, Philips' technische Rundschau, Nr 9, 1958/59.
13. *Kleis, D.*, Moderne Beschallungstechnik, II. Elektroakustische Einrichtungen in grossen Theatern, Philips'technische Rundschau. Nr 3, 1959/60.
14. *Matras, J.*, Acoustique architecturale, L'onde électrique, mai 1956.
15. *Meyer, E.—Schloch, A.*, Schluckgradvergleichmessungen, Mitteilungen des Deutschen Akustischen Ausschusses, Verlag von S. Hirzel in Leipzig, 1939.
16. *Meyer, E.—Thiele, R.*, Raumakustische Untersuchungen ih zahlreichen Konzertsälen und Rundfunkstudios unter Anwendung neurerer Messverfahren, Akustische Beihefte (Acustica), Heft 2, 1956.
17. *Olson, H. F.*, Psychology of Sound Reproduction, Audio, June 1972.
18. *Olson, H. F.*, The Measurement of Loudness, Audio, Febr. 1972.
19. *Oppenheim, A.—Wasserman, S.*, Reverberant rooms, their design and use, Electronic World, No. 4, 1966.
20. *Pfalz, R.*, Permeabilitätsmuster und Membranpotentiale: Grundlagen für die Diskussion von Versuchsergebnissen in der Cochlea, Hörgeräte-Akustik, Sonderheft, Okt. 1970.
21. *Rettinger, M.*, Reverberation Chambers, Journal of the Audio Engineering Society, Nov. 1972.
22. *Richings, W. V.*, Acoustic Noise Measurement and Analysis, Wireless World, Jan. 1964.
23. *Shears, T.*, Recording studio design, Wireless World, Sept. 1951.
24. *Silver, S. L.*, Acoustic energy transformation in the human auditory system, Journal of the Audio Engineering Society, Jan.—Febr. 1975.
25. *Simmons, J. A.*, Response of the Doppler echolocation system in the bat, Rhinolophus ferrumequinum, The Journal of the Acoustical Society of America, Aug. 1974.
26. *Somerville, T.—Gilford, C. L. S.*, Composite cathode ray oscilograph displays of acoustic phenomena and their interpretation, The B. B. C. Quarterly, Vol. VII, No. 1., 1952.
27. *Schroeder, M. R.*, Models of Hearing, Proceeding of the IEEE, Sept. 1975.
28. *Tak, W.*, Nachhallmessung, Philips'technische Rundschau, März 1946.
29. *Tarnoczy, Th.*, Raumakustische Verbesserung des Budapester Stadttheaters, Acustica, Vol. 4. 1954.
30. *Van Urk, A. Th.*, Saalakustik und Nachhall, Philips'technische Rundschau, März 1938.
31. *Vermeulen, R.*, Die Akustik des neuen Utrechter Stadttheaters, Philips'technische Rundschau, Januar 1942.
32. *Vermeulen, R.*, Saalakustik und Schallschluchung, Philips' technische Rundschau, Dec. 1938,
33. *Vermeulen, R.*, Saalakustik und Verständlichkeit, Philips'technische Rundschau, Mai 1938,
34. *White, Ch. E.*, How Loud is Silence? Audio, March 1956.
35. *Zwicker, E.*, Die Zeitkonstanten (Grenzdauern) des Gehörs, Hörgeräte-Akustik, Mai 1974.

ABECEDNO KAZALO

A

Akustička fleksibilnost 158
akustička impedancija 179, 202
akustička prizma 25
akustička školjka 159
akustičke leće 25
akustički niskopropusni filtri 248
akustički om 10
akustički otpor 27
akustički pojasni filtar 247
akustički (Helmholtzov) rezonator 192
akustički spojene prostorije 145
akustika prostorija 94
akustik-ploče 184
akustičko projektiranje 157
ambiofonija 169
apsorpcija auditorija 187
apsorpcija publike 187
apsorpcija zvuka 26, 27
apsorpcija zvuka u atmosferi 126, 209
apsorpcijski klinovi 209
audiogram 45, 215, 216
audiometar 44, 46
auralni harmonici 60
automatska regulacija glasnoće 34

B

Bark 51
bazilarna membrana 36, 37
bel 13
bijeli šum 58, 151
binauralni efekt 68
binauralno lokaliziranje 65, 68
binauralno maskiranje 63
binauralno slušanje 91
bočni reflektori 110
Brownovo molekularno gibanje 42
bubnjić 31, 32, 33, 34
buka 12

C

Cijevna metoda 204, 206, 207, 208
cilijarne stanice 38
cilije 38
cochlea 37
Cortijev organ 37, 38

Č

Čekić 34
čelo valova 20, 162
čisti ton 15, 149

D

Decibel 12, 13
definicija buke 213
definiranost tona 156
difrakcija 22
difuznost zvučnog polja 116, 209, 243
difuznost zvuka 150
difuzori 115
djelomičan gubitak sluha 215
dinamičko područje glazbe i govora 89
dinamika 88
diplacusis 59
direktan zvuk 93
dišuća lopta 3
Dopplerov efekt 28, 73
dozvuk 116, 118
dvostruka pregrada 235, 236, 237
dvostruko slušanje 59

E

Efekt difrakcije 209, 237
efekt fokusiranja 102
efekt maskiranja 63, 64
efekt sjedala 159
eholokacija 72
električka iskra 162
električki spojene prostorije 145
električko iskrište 156
elementarni kuglasti valovi 20, 21
eliptičan tlocrt 103
endolimfa 36
Eustachijeva cijev 33, 34
Eyringova formula 123, 125

F

Faktor izobličenja 71
faktor prijenosa raspora 238
faktor strukture 181, 184
fantomska glava 92
fazna izobličenja 71
fazna razlika 66
flater-jeka 93, 111, 114, 141

frekvencija 6
frekvencijska karakteristika odjeka 136
frekvencijske grupe 51
frekvencijski modulirani ton 150, 243
fon 46
formanti 78, 82

G

Geometrijska akustika 21, 127
glasiljke 76, 77, 78
glasnoća 46, 214
gluha komora 73, 201, 202
govorna akustika 131
govorna snaga 82
govorni kanal 78
govorni mehanizam 77
govorni kod 82
granična frekvencija gluhe komore 202, 203, 204, 205
gubitak sluha 215
gustoća zvučne energije 11, 134, 135, 202

H

Harmonička izobličenja 71
harmonijska tonska visina 57
harmonijske oktave 57
homogenost zvučnog polja 140

I

Indeks glasnoće 53
indeks stropne zvučne izolacije 251, 254
indeks zvučne izolacije pregrade 228
infrazvučne komponente glasova 83
infrazvuk 6
impedancija bubnjića 32
intenzitet zvuka 10
interferencija 128, 130, 149
ISO-glasnoća 50
ISO-soni 50
ispitivanje crtanjem čela valova 160
ispitivanje crtanjem zvučnih zraka 159
ispitivanje metodom valova na vodi 161
ispitni koncerti 156
istaknute vlastite frekvencije 141
istitravanje na prirodnim frekvencijama prostorije 128
izdizanje izvora zvuka 104
izofone 47, 48
izofonske krivulje 47, 48
izolator protiv vibracija 256
izračunavanje vremena odjeka 119, 140

J

Jakost zvuka 10
jasnoća tona 156
jeka 93, 111, 112, 131

K

Kemijska zaštita uha 34
kodiranje signala 39
koeficijent apsorpcije 123, 130, 179, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 189, 191, 196, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 203, 205, 206, 207, 208, 209
koeficijent aprsorpcije zraka 127
koeficijent refleksije 179, 202
kohlearna mikrofonska struja 39
koicidentna frekvencija 230, 231, 232, 233
kombinirani tonovi 60, 61
konduktivna nagluhost 44
konusni apsorberi 185
kontinuirano promjenljiva frkevencija 146, 153
kritične pojasne širine 51
krivulja dozvuka 117, 119
krivulja odjeka 117, 119, 150
krivulja praga čujnosti 42
kružni tlocrt 103
Kundtova cijev 97, 206
kupolast strop 107
kvadrofonija 92
kvinta 56

L

Labirint 34
lepezast tlocrt 102
lepršava jeka 114, 115
limfna tekućina 36
logaritamski pisač 146, 147, 148, 153
lokaliziranje 66, 67, 68

M

Mali otvori 237, 238
maskiranje tonova 61
mel 57
melodija 57
melodijska tonska visina 57
metoda odječne komore 208
melodijske oktave 57
membranski apsorber 188, 190
mikrobar 8
Millingtonova formula 123, 143
minimalan specifični volumen 95
mjerenje raspodjele zvučne energije 154
mjerenje razine glasnoće 54
mjerenje vremena odjeka 146
mjerenje zvučnog prigušivanja pregrade 242
molekularna apsorpcija 206
muzička akustika 131, 133
muzički ton 15

N

Nadzvučni tutanj 16
nagluhost 215
nakovanj 34
nametnuta frekvencija 128
naušnjaci 222
nelinearna karakteristika uha 60
nelinearne prijenosne karakteristike 71
nepovoljne refleksije 102
neuroni 39
normirana razina udarne buke 250, 254
normirana razlika zvučnih razina 245
nul-metoda 66
nulta razina zvučne snage 14
nulta razina zvučnog intenziteta 14
nulta razina zvučnog tlaka 14

O

Odječna energija 159
odječna komora 205, 206, 242
odjek 93, 94, 116, 118
okrugli prozorčić 34, 37
okta 58
oktava 56, 57, 58
oktavni filtar 18
opasna buka 55
optička metoda 162
optimalan odjek 130
optimalan volumen koncertne dvorane 95
optimalna duljina vremena odjeka 93
optimalno vrijeme odjeka 130, 133, 134, 135, 136
osjet ravnoteže 36
osjetljivost na potresanje 217
oštrina sluha 43
otpor strujanju 181, 183
ovalni prozorčić 34, 37
ovjesni apsorberi 184, 185
ovjesni panelni rezonatori 198

P

Panelni rezonatori 195, 196, 197, 198
panelni rezonatori s rasporom 200, 201
paskal 8
perceptivna nagluhost 44
perilimfa 36
pištolj sa slijepim mecima 151
planetarij 112, 113
plivajući pod 253
početni tranzijent 84
područja formanata 78, 79
pojedinačni rezonatori 192, 193, 194, 241
polukružni kanali 34
pomačna amplituda 10
pomak čestica 10
pomoćna rezonancija 168
popratni šumovi glazbala 85
porozni apsorber 180
poroznost 181, 184
portamento 84
potresanje 217
površina auditorija 96
prag bola 44
prag čujnosti 42, 43, 46
prag razlikovanja frekvencije 59
prag razlikovanja frekvencije u šišmiša 74
prag razlikovanja zvučnog intenziteta 50
prasak 16
pravila građevinske akustike 245
predvorje 34
prekrivanje tonova 61
prepoznavanje tona instrumenta 85
prirodne frekvencije prostorije 98
proces utišavanja 118
promjena praga čujnosti 214
promjenljivo vrijeme odjeka 138
protraktor 149
protuvibracijski izolator 256
pseudostereofonija 92
psihofizika 50
pulsno-frekvencijska modulacija 39
punoća tona 156
putni valovi 40
putujući val 37
pužnica 34, 36

R

Rana energija 159
raspodjela zvučne snage 83
razina frekvencije 58
razina glasnoće 49, 51, 52
razina zvučnog intenziteta 13, 14
razina zvučne snage 13, 14, 205
razina zvučnog tlaka 13, 14, 154
razina udarne buke 248, 250, 253
rečenična melodija 78, 82
referentna apsorpcija 250
referentna zvučna snaga 14
referentni zvučni intenzitet 14
referentni zvučni tlak 13, 46
referentno vrijeme odjeka 245
refrakcija zvučnog vala 23
refleksija zvuka 20
reflektirani zvuk 116
reflektori zvuka 109, 111
Reissnerova membrana 36
rejl 10
relaksacijsko titranje glasiljki 77
relativna vlažnost zraka 126, 164
reprodukcija glazbe 91
reverberacija 118
reverberacijski procesor 151, 153
rezidualni ton 61
reziduum 61
rezonantna frekvencija bubnjića 32

rezonantne frekvencije prostorije 98, 99, 100, 128
rezonatori s rasporom 192, 199

S

Sabin 123, 186, 199
Sabineova formula 122, 123, 135
Schroeder-Kuttruffova metoda 151, 152
sintetički govor 82
slogovna razumljivost 131, 132, 133, 215
slušna akustika 31
slušna ploha 41, 47
slušne koščice 33, 34, 37
slušni aparat 46
slušni kanal 31, 32
slušni proces 37
slušni živac 39
slušno uspoređivanje 46
snaga govora 82
son 50
specifični akustički otpor 10
specifični akustički otpor zraka 33
specifični otpor strujanju 183
spektar buke 219
spojeni rezonatorski sistemi 192, 195, 196
srednje uho 31
srednje zvučno prigušivanje 224, 228, 230, 242, 244
srednji koeficijent apsorpcije 125
srednji slobodni put 124
standardna visina tona 87
standardna propusnost 250
standardne krivulje zvučne izolacije 224, 226, 227
standardno prigušivanje 250
stereofonska reprodukcija 92
stereofonski prijenos 91
Stevensonova metoda 53
stojni valovi 28, 97, 98, 206, 246
stremen 34
stroj s batićima 248
stropna pregrada 248
stropna zvučna izolacija 250, 251, 253
stupanj zvučnog prigušivanja 244

Š

Širokopojasni šum 64
šišmiševa orijentacija 74
šišmiševi krikovi 73
štetna buka 55
šum 16

T

Tensor stapedius 34
tensor tympani 34
terčni filtar 18, 151, 152
tetrafonija 92
titrajna brzina 10
titrajna brzina, efektivna 10
titranje savijanjem 230
titranje prvog, drugog i trećeg reda 128
točkasti izvor zvuka 201
tonska grupa 51
tonska visina 56
tonska vrijednost 57, 59
toplinski šum 58
topotni stroj 248
tremolo 84
trenutni analizator 19
treptaji 30, 59, 63
treptajni valovi 29

U

Udarno-zvučna zaštitna mjera 251
ultrazvučna metoda 163
ultrazvučno orijentiranje životinja 72
ultrazvuk 6
umjetni govor 82
unutrašnje uho 31, 34
uravnoteženost 156
usklađenost 156
uskopojasni šum 63
usmjerna difuznost 155
usmjerna karakteristika govora 80
usmjerna karakteristika izvora 30
usmjerna raspodjela rane energije 159
usmjerna raspodjela zvučnih refleksija 155
usmjerenost slušanja dupina 74
usmjerne karakteristike glazbala 86
usmjerne karakteristike govornog organa 81
ušna školjka (uška) 32

V

Valna akustika 100, 128, 130
valna duljina 6
valovi, longitudinalni 2, 6
valovi, površinski (Rayleighovi) 2
valovi rastezanja 2
valovi savijanja i uvijanja 2
valovi, transverzalni 2
vanjsko uho 31
vibracije 217, 254
vibracijska buka 219
vibrato 30, 84, 85
vibrato-efekt 130
vibrator 46
vidljivi govor 79, 80
visina tona 56
višestruka pregrada 233
vlastite frekvencije prostorije 98
voder 82

vokoder 82
volumen kino-dvorane 96
volumen po slušaocu 95
volumen studija 96
vremenska raspodjela zvučnog tlaka 90
vremenska razlika 67
vrijeme odjeka prostorije 93, 132, 206
vrijeme odjeka sluha 69, 70
vrijeme prepoznavanja tonske visine 70

W

Weber-Fechnerov zakon 50

Z

Zakon prvog valnog čela 142
zakrivljen strop 106
zaobilazno provođenje zvuka 224
završni tranzijent 84
zračna buka 219
zračni jastuk 191, 234
zvučna izolacija (izračunavanje) 224
zvučna propusnost 223
zvučna snaga 12
zvučna snaga govora 83
zvučna zaštitna mjera 228
zvučne zrake 20, 116
zvučni intenzitet 10, 11
zvučni spektar 14, 15
zvučni tlak 8, 11
zvučni tlak, efektivni 8
zvučno prigušivanje 223, 233, 238, 245, 246, 247
zvučno prigušivanje pregrade 224, 227, 229 245, 246, 247
zvučno prigušivanje prozora 240
zvučno prigušivanje vrata 238, 239
zvuk, definicija 1
zvukomjer 54, 226, 249
zvukovod 31

Ž

Živčana akciona struja 39

Izdavačko poduzeće »Školska knjiga«
Zagreb, Masarykova 28

Za izdavača
JOSIP MALIĆ

Grafički urednik
MARIJAN GORŠIĆ

Korektor
SLAVICA ŠKEMBER

Tiskanje završeno u veljači 1978.